

---

# Erweiterung eines phänomenologischen Lidar-Sensormodells durch identifizierte physikalische Effekte

---

**Masterthesis Nr. 743/19**

Bearbeiter: Jonas Franz Tamm-Morschel | 1802498

Betreuer: Philipp Rosenberger, M. Sc.

Co-Betreuer: Martin Holder, M. Sc. und Clemens Linnhoff, M. Sc.

---



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**FZD** FAHRZEUGTECHNIK  
TU DARMSTADT

REGELUNGSTECHNIK  
UND MECHATRONIK **itm**

---



## Masterthesis Nr. 743/19 im Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik (30 CP)

von Jonas Franz Tamm-Morschel

Beginn: 17.04.2019  
Zwischenkolloquium: \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_  
Ende: 17.10.2019

**Thema:** Erweiterung eines phänomenologischen Lidar-Sensormodells  
durch identifizierte physikalische Effekte

**Topic:** *Enhancement of a phenomenological lidar sensor model with  
identified physical effects*

Fachgebiet Fahrzeugtechnik



Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Otto-Berndt-Straße 2  
64287 Darmstadt  
Fax +49 6151 16 - 24205  
[www.fahrzeugtechnik-darmstadt.de](http://www.fahrzeugtechnik-darmstadt.de)

Bearbeiter:  
Philipp Rosenberger, M.Sc.  
Tel. +49 6151 16 - 24213  
[rosenberger@fzd.tu-darmstadt.de](mailto:rosenberger@fzd.tu-darmstadt.de)

Datum  
16.04.2019

Am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt (FZD) wird in Zusammenarbeit mit der Industrie am Thema Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen (HAF) geforscht. Hierbei steht insbesondere der virtuelle Fahrversuch in der Simulation im Vordergrund, der neben der Modellierung der Umwelt auch die Modellierung der Wahrnehmung dieser durch das simulierte Fahrzeug beinhaltet. Einen Teil dieser gesamtheitlichen Wahrnehmung des Umfelds bildet die Lidar-Sensorik. Sie liefert eine Punktwolke, welche für angestrahlte und entsprechend reflektierende Objekte neben der Abstandsbestimmung eine Näherung der Geometrie, eine Klassifikation und eine Bewegungsverfolgung ermöglicht. Zusätzlich ist so auch eine Lokalisierung mittels Landmarken aus statischen Objekten möglich.

Um eine hohe Modellgüte der Lidar-Sensormodelle zu erreichen, ist eine genaue Kenntnis über die Funktionsweise des Sensors erforderlich. Eine bereits existierende, phänomenologische Implementation eines Lidar-Sensormodells für den virtuellen Fahrversuch soll in dieser Arbeit auf Basis aktueller Forschung um physikalische Effekte erweitert werden. Bei FZD steht ein Modell zur Verfügung, welches mittels Raycasting das Sichtfeld eines Sensors abdeckt und die berechnete Punktwolke über standardisierte und proprietäre Schnittstellen weitergeben kann. In dieser Arbeit soll das bestehende Konzept an verschiedenen Punkten erweitert und verbessert werden.

Als Ergebnisse der Masterthesis werden erwartet:

1. Eine umfassende Einarbeitung und Literaturübersicht über den Stand der Technik von Lidar-Sensoren und deren Simulation zur Generierung von Punktwolken ist durchgeführt und dokumentiert.

Seite: 1/2

CP	Dauer Zwischenkolloq (Vortrag / gesamt)	Dauer Abschlusskolloq (Vortrag / gesamt)
< 18	5 - 7 / 15 min	15 / 45 min
> 18	10 / 20 min	20 / 60 min



2. Komplettes Verständnis des vorhandenen, phänomenologischen Sensormodells und dessen modularen Aufbaus inklusive der standardisierten Schnittstellen ist nachgewiesen und dokumentiert.
3. Die aktuelle Forschung zu möglichen physikalischen Effekten, die Messungen mit aktueller und zukünftiger Lidar-Sensorik beeinflussen können, ist bekannt und beschrieben.
4. Die Effekte sind auf ihr Potential zur Verbesserung der Wiedergabetreue des aktuellen Modells hin bewertet.
5. Nach der vorher erfolgten Priorisierung sind die als machbar bewerteten Effekte implementiert und durch eigene Messungen in der Realität parametrisiert.
6. Vorschläge zu möglichen Experimenten zur Validierung der Effekte aus der Erfahrung der Parametrisierung sind erbracht.
7. Die Dokumentation der Methodik des Vorgehens und der erzielten Ergebnisse inklusive deren Diskussion ist erfolgt.

#### Schwerpunkte der Bewertung:

- Methodik des Vorgehens
- Vollständigkeit
- Belastbarkeit der Argumentation
- Nachvollziehbarkeit

Die Arbeit bleibt Eigentum des Fachgebiets. Auf das Merkblatt des Fachgebiets wird hingewiesen.

Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Betreuer: Philipp Rosenberger, M. Sc.

Co-Betreuer: Clemens Linnhoff, M. Sc.

&

Martin Holder, M. Sc.

---

Jonas Franz Tamm-Morschel  
Matrikelnummer: 1802498  
Studiengang: Elektrotechnik und Informationstechnik

Masterthesis Nr. 743/19  
Thema: Erweiterung eines phänomenologischen Lidar-Sensormodells durch identifizierte physikalische Effekte

Eingereicht: 16. Oktober 2019

Technische Universität Darmstadt  
Fachgebiet Fahrzeugtechnik  
Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner  
Otto-Berndt-Straße 2  
64287 Darmstadt

Technische Universität Darmstadt  
Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik  
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski  
Landgraf-Georg-Str. 4  
64283 Darmstadt

Veröffentlicht unter der Creative Commons Lizenz: CC BY 4.0 International.

---



---

## Ehrenwörtliche Erklärung

---

### Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 23 Abs. 7 APB TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Jonas Franz Tamm-Morschel, die vorliegende Master-Thesis / Bachelor-Thesis ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung überein.

---

### English Translation for information purposes only:

### Thesis Statement pursuant to § 23 paragraph 7 of APB TU Darmstadt

I herewith formally declare that I, Jonas Franz Tamm-Morschel, have written the submitted thesis independently. I did not use any outside support except for the quoted literature and other sources mentioned in the paper. I clearly marked and separately listed all of the literature and all of the other sources, which I employed when producing this academic work, either literally or in content. This thesis has not been handed in or published before in the same or similar form.

I am aware, that in case of an attempt at deception based on plagiarism (§38 Abs. 2 APB), the thesis would be graded with 5,0 and counted as one failed examination attempt. The thesis may only be repeated once.

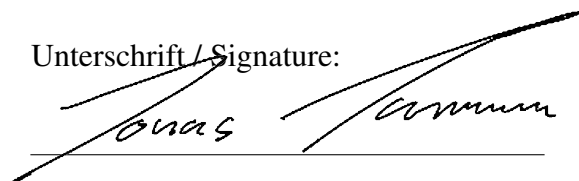
In the submitted thesis, the written copies and the electronic version for archiving are identical in content.

Matrikelnummer:

Datum / Date:

16.10.2019

Unterschrift / Signature:



Jonas Tamm-Morschel

---

## Zusammenfassung

---

Die voranschreitende Entwicklung im Bereich des hochautomatisierten Fahrens lässt den Wunsch nach einer simulationsbasierten Entwicklung der Fahrfunktionen und insbesondere deren Sicherheitsüberprüfung entstehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich durch eine Simulation beliebige Testszenarien mit geringem Aufwand generieren lassen. Das Testen in der Praxis ist hingegen aufwendiger und zeitintensiver. Auch ist eine Simulation wesentlich wirtschaftlicher als Millionen Stunden von Testfahrten im realen Straßenverkehr zu generieren. Für eine möglichst praxisnahe Simulation der Fahrfunktionen sind realitätsnahe Modelle der eingesetzten Sensoren unumgänglich.

Zu den für das hochautomatisierte Fahren zur Verfügung stehenden Sensoren gehören unter anderem Lidar-Sensoren. Sie lassen sich beispielsweise zur Umwelterfassung oder Abstandsmessung verwenden. Lidar-Sensoren basieren auf einem optischen Messprinzip, das auf das Aussenden und anschließende Messen der Laufzeit von zurückreflektierten Lichtstrahlen setzt. Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung des am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt in Entwicklung befindlichen phänomenologischen Modells eines Lidar-Sensors. Dazu werden identifizierte physikalische Effekte in Versuchen parametrisiert und anschließend in das Sensormodell implementiert. Weiterhin erfolgen erste Vergleiche zwischen Modell und Realität.

Die zu implementierenden physikalischen Effekte umfassen das Strahlmuster und die Strahlaufweitung von verschiedenen im Automobilbereich genutzten Sensoren. Ferner sind auch weitere sensorspezifische Eigenschaften berücksichtigt. Die untersuchten Sensoren sind der Ibeo Lux 2010, der Velodyne VLP32 und VLP16 und der Valeo Scala. Die Strahlaufweitung und das Strahlmuster sowie die Intensität, als Messgröße der Velodyne Sensoren, und die Echopulsweite, als Messgröße der Ibeo und Valeo Sensoren, werden mit Hilfe einer Infrarotkamera untersucht und durch Versuche parametrisiert.

Als wichtigstes Ergebnis der Versuche lässt sich festhalten, dass die gemessene Form und Größe von Strahlmuster und Strahlaufweitung von den Herstellerangaben abweichen. Dies führt dazu, dass eine Modellbildung auf Basis der Herstellerangaben unter Umständen nicht ausreichend ist.

Die untersuchten physikalischen Effekte sind in das am Fachgebiet bestehende Sensormodell auf Basis der Versuchsergebnisse des Ibeo Lux 2010 Sensors integriert. Dazu zählen Strahlaufweitung, Strahlmuster und weitere sensorspezifische Parameter. Auch sind erste Ansätze bzgl. des Signalausbaus, der Signaldämpfung durch den Abstand und der Simulation des Spannungsverlaufs im Empfänger zur Berechnung der Echopulsweite implementiert.

Die Ergebnisse der ersten Validierung des erweiterten Sensormodells im Bezug auf die Strahlaufweitung zeigen, dass diese mit steigender Entfernung an Einfluss gewinnt. Das ideale Sensormodell ist somit bei steigendem Abstand zwischen Objekt und Sensor unpräziser als das erweiterte Modell.

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Zusammenfassung .....	I
Inhaltsverzeichnis .....	II
Formelzeichen und Indizes .....	IV
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	IX
1 Einleitung .....	1
1.1 Beschreibung der Aufgabenstellung .....	3
1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung und Methodik des Vorgehens .....	3
2 Grundlagen.....	5
2.1 Elektromagnetische Strahlung.....	5
2.2 Sichtbares Licht und Nahinfrarot .....	6
2.2.1 Physikalische Größen.....	6
2.2.2 Eigenschaften .....	8
2.3 Lidar-Sensoren für Automotive-Anwendungen.....	12
2.3.1 Aufbau und Funktionsweise .....	13
2.3.2 Verschiedene Ausführungsvarianten.....	15
2.3.3 Distanzabhängigkeit des gemessenen Signals.....	17
2.3.4 Charakteristische Eigenschaften von Lidar-Sensoren .....	18
3 Lidar Modellbildung.....	21
3.1 Lidar-Modelle .....	21
3.2 Zusammenfassung bekannter, auf einen Lidar-Sensor wirkenden Effekte .....	22
3.3 Grundlagen der Stahlverfolgung als Ansatz zur Lidar-Modellbildung .....	23
3.3.1 Raytracing .....	23
3.3.2 Raycasting.....	25
3.3.3 Raytracing Framework: Nvidia OptiX .....	25
3.4 Simulation der Reflexionseigenschaften von Oberflächen.....	26
3.4.1 Eigenschaften und Klassen.....	27
3.4.2 BRDF-Modelle .....	28
3.5 Stand der Technik zur Lidar-Modellbildung.....	28
3.6 Diskussion des Stands der Technik .....	30
3.7 Aufbau des Lidar-Modells am Fachgebiet.....	31
4 Versuche zur Untersuchung der zu implementierenden Effekte .....	33
4.1 Messsysteme und Versuchsumgebung .....	33
4.1.1 Verwendete Lidar-Sensoren.....	33
4.1.2 Verwendete Messgeräte .....	38
4.1.3 Sonstige Hilfsmittel.....	39
4.2 Versuchsaufbau .....	40

4.3	Versuch 1: Vermessung des Strahlmusters .....	42
4.3.1	Ziel .....	42
4.3.2	Durchführung .....	42
4.3.3	Ergebnisse .....	43
4.4	Versuch 2: Korrelation der Echopulsweite und Intensität bzgl. des Objekttyps .....	47
4.4.1	Ziel .....	47
4.4.2	Durchführung .....	48
4.4.3	Ergebnisse .....	49
4.5	Versuch 3: Korrelation der Echopulsweite und Intensität bzgl. der Objektgröße .....	50
4.5.1	Ziel .....	50
4.5.2	Durchführung .....	50
4.5.3	Ergebnisse .....	51
4.6	Versuch 4: Korrelation der Echopulsweite und Intensität bzgl. des Umgebungslichts .....	54
4.6.1	Ziel .....	54
4.6.2	Durchführung .....	55
4.6.3	Ergebnisse .....	55
4.7	Versuch 5: Mehrzielfähigkeit an Glasscheiben .....	57
4.7.1	Ziel .....	57
4.7.2	Durchführung .....	57
4.7.3	Ergebnisse .....	58
4.8	Versuch 6: Mehrzielfähigkeit an zwei Objekten .....	62
4.8.1	Ziel .....	62
4.8.2	Durchführung .....	62
4.8.3	Ergebnisse .....	64
4.9	Bewertung der Ergebnisse .....	65
5	Implementierung der physikalischen Eigenschaften ins Modell .....	67
5.1	Grundlegender Aufbau des OptiX-Frameworks .....	67
5.2	Ideales Lidar-Sensormodell .....	68
5.3	Erweiterung des Raytracers um die Strahlaufweitung durch Überabtastung .....	70
5.4	Externes C++-Programm im Open Simulation Interface .....	74
5.5	Weitere Ergänzungen am Modell .....	79
5.6	Verifizierung des Modells und Zusammenfassung .....	79
6	Validierung des Sensormodells .....	81
6.1	Beschreibung des Testszenarios .....	81
6.2	Metriken zur Bewertung von Lidar-Sensormodellen .....	82
6.3	Auswertung der Simulation anhand der Metriken .....	84
6.4	Diskussion der Ergebnisse .....	87
7	Fazit und Ausblick .....	90
A	Anhang .....	94
	Literaturverzeichnis .....	101



---

## Formelzeichen und Indizes

---

Lateinische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$c$	$\text{m s}^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit
$d$	m	Entfernung, Distanz
$E$	$\text{V m}^{-1}$	Feldstärke
$f$	Hz	Frequenz
$I$	$\text{W m}^{-2}$	Intensität, Flächenleistungsdichte
$I$	A	Strom
$L$	$\text{W m}^{-2}$	Leuchtdichte, Strahldichte
$o$	m	Dicke
$P$	W	Leistung
$R$	$\Omega$	Widerstand
$r$	m	Strahlaufweitung
$U$	V	Spannung
$v$	$\text{m s}^{-1}$	Geschwindigkeit

Griechische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$\alpha$	rad	Azimutwinkel
$\beta$	rad	Elevationswinkel
$\theta$	°	Divergenzwinkel
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\sigma$	$\text{m}^2$	Radarquerschnitt
$\phi$	W	Lichtleistung, Strahlungsfluss
$\omega$	Hz	Frequenz

Indizes:

Zeichen	Bezeichnung
div	Divergenz
photon	Photon
r	einfallende bzw. empfangene Größe



Zeichen	Bezeichnung
t	ausfallende bzw gesendete Größe
total	Gesamt

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

$D_{pp}$	Pointcloud Distance Metric
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
BRDF	Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion
CSV	Comma-separated Values
ECU	Electronic Control Unit
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsystem
FOV	Field of View
FZD	Fahrzeugtechnik TU Darmstadt
HiL	Hardware in the Loop
IG	Image Generator
Lidar	Light Detection and Ranging
Lkw	Lastkraftwagen
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
NIR	Nahinfrarot
OCR	Occupied Cells Ratio
OSI	Open Simulation Interface
Pkw	Personenkraftwagen
PTX	Parallel Thread Execution
Radar	Radio Detection and Ranging
SNR	Signal to Noise Ratio
TOF	Time of Flight
TU	Technische Universität

---

## Abbildungsverzeichnis

---

2-1	Darstellung der Strahlengleichung und des Brechungsgesetzes .....	9
2-2	Transmission in der Atmosphäre und verschiedene Reflexionsarten .....	11
2-3	Schematischer Aufbau eines Lidar-Sensors .....	13
2-4	Beispiel für einen Spannungsverlauf im Empfänger eines Lidar-Sensors.....	15
2-5	Verschiedene Ausführungsvarianten eines Lidar-Sensors .....	16
2-6	Darstellung der für die Laser-Radar-Gleichung relevanten Größen.....	18
3-1	Beispielhafter Verlauf eines Lichtstrahls beim Raytracing .....	24
3-2	Darstellung der für eine BRDF relevanten Raumwinkel .....	27
3-3	Aufbau des Sensormodells bei FZD.....	31
4-1	Darstellung des Strahlmusters beim Ibeo Lux 2010.....	35
4-2	Darstellung des Aufbaus der Diode und des Strahlmusters beim Velodyne VLP-32 .....	38
4-3	Bilder zum Versuchsaufbau.....	41
4-4	Skizze des Versuchsaufbaus .....	41
4-5	Versuch 1 Strahlmuster des Ibeo Lux 2010 Sensors.....	44
4-6	Versuch 1 Strahlmuster des Velodyne VLP-32 Sensors .....	46
4-7	Versuch 1 Strahlmuster des Valeo Scala Sensors .....	47
4-8	Versuch 2 Echopulsweite und Intensität für verschieden gut reflektierende Objekte .....	49
4-9	Versuch 2 Punktwolke des Ibeo Lux 2010 .....	50
4-10	Versuch 3 8 m Unterschiedliche Reflektorgrößen .....	52
4-11	Versuch 3 11 m Unterschiedliche Reflektorgrößen.....	52
4-12	Versuch 3 Echopusweiten bei zehn Wiederholungen .....	53
4-13	Versuch 3 Intensitäten bei zehn Wiederholungen.....	53
4-14	Versuch 4 Echopusweiten bei Licht und bei Dunkelheit für den Ibeo Lux 2010 .....	56
4-15	Versuch 4 Intensität bei Licht und bei Dunkelheit für den Velodyne VLP-32.....	56
4-16	Versuch 5 Versuchsaufbau mit Position der Scheiben .....	58
4-17	Versuch 5 Darstellung der Echos Ibeo Lux 2010 .....	59
4-18	Versuch 5 Darstellung der Echopulsweiten des Ibeo Lux 2010 für zehn Wiederholungen .....	60
4-19	Versuch 5 Detektionen des Velodyne VLP-16 .....	61
4-20	Versuch 5 Darstellung der Intensitäten des Velodyne VLP-16 für zehn Wiederholungen .....	61
4-21	Versuch 6 Infrarotaufnahme des Strahlenmusters .....	63
4-22	Versuch 6 Darstellung der Echopulsweiten des Ibeo Lux 2010 .....	64
4-23	Versuch 6 Darstellung der Echos des Ibeo Lux 2010 .....	65
5-1	Struktur der Erweiterung des Sensormodells.....	71
5-2	Darstellung des simulierten Strahlmusters im erweiterten Sensormodell .....	76
5-3	Darstellung der Bildung von Range Bins und des Schwellwertes.....	77
6-1	Versuchaufbau des Testszenarios .....	82
6-2	Darstellung der Metriken ohne Berücksichtigung des Höhenprofils.....	86
6-3	Darstellung der Metriken mit berücksichtigung des Höhenprofils .....	87



---

A-1 Darstellung der Punktwolken für Versuch 5.....	94
A-2 Vergleich zweier Strahlmuster des IbeoLux 2010 .....	95
A-3 Infrarotaufnahme des Ibeo Lux 2010 Lux 1.....	96
A-4 Infrarotaufnahme des Ibeo Lux 2010 Lux 4.....	97
A-5 Infrarotaufnahme des Velodyne VLP-16.....	97
A-6 Infrarotaufnahme des Velodyne VLP-32.....	98
A-7 Vergleich der realen und der simulierten Punktwolke.....	99

---

## Tabellenverzeichnis

---

2-1	Darstellung der Distanzabhängigkeit bei der Messung eines Lidar-Sensors .....	18
4-1	Ausschnitt aus der Anordnung der Layer des Velodyne VLP-32 .....	37
4-2	Versuch 2 Dimensionen der Reflektormaterialien.....	48
4-3	Versuch 3 Auflistung der verschiedenen Reflektorgößen .....	51
5-1	Ergänzte Parameter im erweiterten Sensormodell .....	72
6-1	Parameter des Testszenarios.....	82
6-2	Einbaupositionen der Ibeo Lux Sensoren .....	82

---

# 1 Einleitung

---

Die Anzahl der verbauten Fahrerassistenzsysteme in Personenkraftwagen (Pkw) nimmt in den letzten Jahren immer weiter zu. Sowohl technische Systeme zur Steigerung der Sicherheit wie Antiblockiersystem (ABS) und Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) als auch neue Funktionen zur Erhöhung des Komforts wie ein Parkpilot, Adaptive Cruise Control (ACC) und Spurhalteassistenten finden Eingang in immer mehr Pkw. Der nächste große Schritt bei Fahrerassistenzsystemen geht in Richtung vollautomatisiertes Fahren. Anwendung findet dies zuerst auf Autobahnen und in Parkhäusern und kann anschließend auch auf Landstraßen und in der Stadt (urbaner Bereich) angewendet werden.<sup>1</sup> Das vollautomatisierte Fahren verspricht dem Fahrer hohen Komfort, einen Sicherheitsgewinn und kann zu einer kompletten Veränderung der Mobilität führen. Mit Hilfe des vollautomatisierten Fahrens wird beispielsweise die Anzahl der Unfälle im Verkehr deutlich reduziert. Das Reisen mit dem Auto wird entspannter und die Zeit während des Pendelns zur Arbeit lässt sich sinnvoller nutzen, da der Fahrer das Steuern nicht mehr übernehmen muss.<sup>2</sup>

Die Verwendung von immer mehr neuen und komplexeren Assistenzsystemen bedeutet auch eine Steigerung der Komplexität der Technik und damit auch eine schwierigere Sicherheitsüberprüfung der Assistenzsysteme, um in jeder möglichen Situation ein korrektes Verhalten sicherzustellen. Dies hängt u.a. mit dem steigenden Einsatz von neuronalen Netzen zur Realisierung der Funktionen zusammen. Bei diesen ist ein einfacher Stabilitätsnachweis, wie bei einem herkömmlichen Regelkreis, nicht möglich. Vollautomatisierte Fahrzeuge werden eine große Anzahl von gefahrenen Kilometern nachweisen müssen, um von einer hohen Sicherheit des Systems in allen möglichen Fahrsituationen ausgehen zu können.<sup>3</sup> Daher wird nach Alternativen zu den klassischen Testfahrten auf der Straße gesucht. Auch werden für das Trainieren der erwähnten neuronalen Netze eine große Menge an Daten benötigt. Eine Alternative für die erwähnten Aspekte ist die Generierung von Daten mit Hilfe einer Simulationsumgebung. Dazu wird eine, der realen Welt möglichst ähnliche, Virtuelle Umgebung am Simulationsrechner modelliert, in der sich beliebige Szenarien und Situationen abbilden lassen. Hierzu werden möglichst realitätsnahe Modelle für die eingesetzten Sensoren benötigt.

Insbesondere bei denen für Assistenzsysteme zur Umwelterfassung eingesetzten Light Detection and Ranging (Lidar)- und Radio Detection and Ranging (Radar)-Sensoren ist dies eine weniger triviale Aufgabe, da sehr viele verschiedene Effekte auf die Sensoren Einfluss nehmen. Hierzu zählen beispielsweise atmosphärische Dämpfung, Einflüsse durch das Wetter (Sonne, Regen, Nebel) oder sensorspezifische Eigenschaften. Da diese Effekte später auch Einfluss auf das Verhalten der neuronalen Netze haben, werden diese auch abgebildet. Beispielsweise wird durch das nicht Betrachten verschiedener Effekte eine Gefahrensituation in der Simulation einfach identifiziert, was in der Realität nicht möglich ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Modellierung von Sensoren betrachtet. Die Modellbildung bezieht sich im Folgenden auf die Abbildung des Sende- und Empfangszweiges des Sensors, also das

---

<sup>1</sup> Richarz, H. R.; Kirchbeck, B.: Fahrer Assistenzsysteme Der Weg zum autonomen Fahrzeug (2019).

<sup>2</sup> Härtner, H.: Autonomes Fahren, vom Fahrzeug zum Lebensraum (2019).

<sup>3</sup> Roeder, S.: Fahrsimulation und autonomes Fahren (2018).

---

Berücksichtigen der Eigenschaften und Effekte beim Senden und Empfangen der verwendeten Strahlung. Ebenso werden Umwelteinflüsse, die auf die ausgesendete Strahlung wirken, betrachtet, wie zum Beispiel die Dämpfung der Atmosphäre und die Reflexionseigenschaften von Körpern.

Verschiedene Ansätze für die Modellierung von umgebungserfassenden Sensoren finden bereits Anwendung in virtuellen Simulationsumgebungen<sup>4</sup>. Ein idealer Sensor, ohne Berücksichtigung jeglicher Effekte und Einflussfaktoren, stellt einen Ansatz mit dem geringsten Aufwand dar. Das Modell besitzt einen idealen Messbereich und kann nur die exakte Position und Orientierung eines Objekts in der simulierten Umgebung darstellen.

Eine andere Kategorie von Sensormodellen sind phänomenologische, zu denen stochastische und physikalische Sensormodelle gehören. Stochastische Sensormodelle basieren auf probabilistischen oder statistischen Ansätzen zur Modellierung von beobachtbaren Effekten. Der Aufwand der Erstellung eines solchen Sensormodells ist nur wenig höher im Vergleich zum idealen Sensormodell. Es lassen sich unter anderem Fehlererkenntnisse (Falsch Positiv und Falsch Negativ), Rauschen, atmosphärische Dämpfung und Sensorverschmutzung abbilden.

Im Gegensatz dazu sind physikalische Modelle, die auf Gleichungen basieren und damit Effekte im Detail beschreiben, beliebig komplex. Sie modellieren beispielsweise Effekte wie die Signalausbreitung sowie Reflexion, Transmission, Absorption des gesendeten Strahls und die Beugung und Brechung dieser an Objekten. Mögliche Spezifikationen eines solchen Sensormodells sind Wellenlänge, Material und Oberflächeneigenschaften sowie Signalverarbeitung. Physikalische und stochastische Sensormodelle lassen sich zur Vereinfachung auch miteinander kombinieren, beispielsweise durch stochastisch ermittelte Parameter in den Gleichungen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der phänomenologischen Modellbildung von Lidar-Sensoren. Die Technik hinter Lidar-Sensoren, das Abscannen der Umgebung durch gebündelte Lichtstrahlen, ist nicht neu. Sie wird schon seit Jahrzehnten in der Raumfahrt, der Industrie und der Robotik eingesetzt, beispielsweise auch in Pkw zur Realisierung von ACC-Funktionen.<sup>5</sup> Jedoch haben Radar-Sensoren und Kameras sie aufgrund einiger Nachteile mit der Zeit etwas verdrängt. Hierzu zählen insbesondere die Größe der Lidar-Sensoren, die Empfindlichkeit gegenüber Schmutz und die Anfälligkeit der rotierenden Spiegel.

Für das autonome Fahren bietet der Lidar-Sensor jedoch einige Vorteile, wie die Möglichkeit einer Rundumsicht von 360° und eine hohe Tiefenauflösung. Außerdem zeigen neueste Forschungen, dass die Entwicklung des Lidar-Sensors keinesfalls am Ende ist, sondern noch ein hohes Potential besitzt. Beispielsweise sind Lidar-Sensoren auf Basis von Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) -Spiegeln denkbar, welche die Baugröße und die Empfindlichkeit der Hardware deutlich verbessern. Ein anderer Forschungszweig geht in Richtung von Optical Phased Arrays (OPA). Hierbei wird mit Hilfe einer Dioden-Matrix und dem Variieren der Phase jeder Diode durch einen Impuls ein größerer Bereich abgedeckt.<sup>6</sup>

---

<sup>4</sup> Rosenberger, P. et al.: Towards a Generally Accepted Validation Methodology (2019).

<sup>5</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 326-327.

<sup>6</sup> Reeb, W.; Härter, H.: Der Status quo von Lidar in selbstfahrenden Autos (2019).



---

## 1.1 Beschreibung der Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung und Verbesserung des bei Fahrzeugtechnik TU Darmstadt, kurz FZD, entwickelten phänomenologischen Lidar Sensormodells. Hierzu wird zuerst eine Literaturrecherche zum Stand der Technik von Lidar-Sensoren durchgeführt. Inbegriffen ist auch ein Überblick von Simulations-Modellen zur Generierung von Punktwolken durch Lidar-Sensoren für die Umwelterfassung von Fahrzeugen. Anschließend erfolgt eine Einarbeitung und Dokumentation in das bestehende Sensormodell am Fachgebiet.

Zudem ist eine Recherche zum Stand der Forschung durchzuführen, dabei sind physikalische Effekte und ihr Einfluss auf Messungen mit aktuellen und zukünftigen Lidar-Sensoren betrachtet. Darauf aufbauend werden diese bewertet und anschließend für das Modell als relevant eingeschätzten Effekte durch eigene Messungen in der Realität parametrisiert. Anschließend werden diese ins bestehende Modell implementiert. Dann erfolgt eine Dokumentation und Diskussion der Ergebnisse.

## 1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung und Methodik des Vorgehens

Das bestehende Lidar-Sensormodell des FZD bildet Aussenden und Empfangen der Strahlung eines Lidar-Sensors ab. Da es sich dabei um ein ideales Ray-Casting Verfahren handelt, werden die Umwelteinflüsse, die auf die gesendete Strahlung wirken, nicht betrachtet. Bei diesem Verfahren wird der Sensor durch das Beschießen der virtuellen Umgebung mit diskreten dünnen „Strahlen“ in der Winkelauflösung des realen Sensors simuliert. Dies wird in Kapitel 3.3 im Detail erläutert. Wie im Abschnitt 1.1 bereits beschrieben, ist das Ziel der Arbeit dieses Sensormodell um relevante physikalische Effekte und Umwelteinflüsse zu erweitern. So soll ein möglichst genaues Abbild realer Sensoren entstehen.

Für ein grundlegendes Verständnis der physikalischen Eigenschaften der verwendeten Strahlung sowie der Funktionsweise und des Aufbaus von Lidar-Sensoren werden diese in Kapitel 2 zusammengefasst.

Nach der Einarbeitung in die Grundlagen folgt in Kapitel 3 eine Beschreibung von verschiedenen Klassen an Lidar-Modellen. Dann eine Zusammenfassung und Ergänzung der in Kapitel 2 beschriebenen auf einen Lidar-Sensor wirkenden Effekte und Eigenschaften, welche für die Modellbildung relevant sind. Anschließend folgt für ein Verständnis der Funktionsweise des Sensormodells eine Beschreibung des Raytracing-Verfahrens und der Bidirektionalen-Reflexions-Verteilungsfunktion (engl. Bidirectional-Reflexion Distribution Function, kurz BRDF). Die BRDF ermöglicht eine Berechnung der Intensität der zum Sensor zurück reflektierten Strahlung bei Interaktion mit einem Körper.

Es folgt eine Darstellung zum Stand der Technik der Lidar-Modellbildung und insbesondere der Simulation von physikalischen Effekten bei Lidar-Sensoren. Mit Hilfe des Stands der Technik soll ein Eindruck gewonnen werden, welche Effekte das Sensormodell am effektivsten verbessern und welche Effekte noch wenig erforscht sind. Am Ende des Kapitels werden die Erkenntnisse aus dem Stand der Technik diskutiert und ein Überblick auf das am Fachgebiet entstehende Sensormodell gewährt.

---

Es erfolgt auch eine Einordnung der geplanten Erweiterungen, wie z.B. der Strahlaufweitung, in das Modell durch diese Arbeit.

Die sich durch den Stand der Technik in Kapitel 3 als vielversprechend für die Erweiterung des Sensormodells herausgearbeiteten physikalischen Effekte und Umwelteinflüsse werden in Kapitel 4 durch Versuche an verschiedenen, dem Fachgebiet zur Verfügung stehenden Lidar-Sensoren genauer untersucht und parametrisiert. Die Erkenntnisse daraus werden anschließend in das Sensormodell implementiert. Der Schwerpunkt der Versuche liegt durch die Ergebnisse von Kapitel 3 bei der optischen Untersuchung und Vermessung der Strahlaufweitung und des Strahlmusters der Lidar-Sensoren. Auch erfolgt eine Untersuchung der verschiedenen Messgrößen der jeweiligen Sensoren. Hierzu zählt die Strahlaufweitung und das sogenannte Strahlmuster von Lidar-Sensoren. Die Auswertung der Versuche folgt im Anschluss der Versuchsbeschreibung eines jeden Versuchs.

Anschließend wird in Kapitel 5 beschrieben, wie die Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 5 in das bestehende ideale Sensormodell implementiert werden, um eine gesteigerte Genauigkeit des Modells im Bezug zum realen Sensor zu erreichen. Um einen ersten Eindruck, insbesondere vom Potenzial der Erweiterung der Strahlaufweitung, zu bekommen, wird das Modell in Kapitel 6 mit Hilfe zweier Metriken mit dem ursprünglichen idealen Sensormodell bezüglich eines realen Testszenarios verglichen. In Kapitel 7 folgt das Fazit der Arbeit und ein Ausblick zu möglichen weiteren Aspekten zur Validierung des Modells und zu weiteren potenziellen Verbesserungspunkten.

---

## 2 Grundlagen

---

Die in einem Fahrzeug eingesetzte Sensorik zur Umfelderkennung nutzt verschiedene Bereiche des elektromagnetischen Spektrums. Beispielsweise den Bereich des sichtbaren Lichts in Kameras sowie Mikrowellen in Radarsensoren. Im folgenden Abschnitt 2.1 wird eine Beschreibung der elektromagnetischen Strahlung sowie eine Einordnung und Definition der von Lidar-Sensoren genutzten Strahlung in das elektromagnetische Spektrum durchgeführt. Diese liegt im Bereich der Optik, umfasst also Strahlung vom Ultraviolett bis ins Ferninfrarot. Lidar-Sensoren nutzen Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichts und des Nahinfrarots. Daher werden in Abschnitt 2.2 relevante Grundlagen dieses Bereiches näher betrachtet. So wird ein Verständnis der für Lidar-Sensoren relevanten Größen erlangt. Anschließend wird auf die grundlegende Funktionsweise und die Eigenschaften von Lidar-Sensoren eingegangen und die zuvor beschriebenen Grundlagen der verwendeten Strahlung auf diese Sensoren angewendet.

### 2.1 Elektromagnetische Strahlung

Elektromagnetische Strahlung beschreibt eine Form der Energieausbreitung. Die Strahlung lässt sich auch als Welle erfassen. Wellen sind Schwingungen und ändern sich periodisch. Sie lassen sich als Sinus-Funktion beschreiben. Die physikalischen Eigenschaften einer elektromagnetischen Welle sind die Wellenlänge  $\lambda$ , die Frequenz  $f$  und die Polarisierung. Der Zusammenhang zwischen Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  ist durch

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2-1)$$

mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  gegeben.

Die Gesamtheit aller vorkommenden Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung wird als elektromagnetisches Spektrum bezeichnet. Dieses erstreckt sich über einen großen Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich. Zum Spektrum gehören niederfrequente Radiowellenlängen bis hin zu extrem hochenergetischer, kurzwelliger nuklearer Gamma Strahlung.<sup>7</sup>

Lidar-Sensoren sind optische Sensoren und arbeiten daher mit elektromagnetischen Wellen im optischen Bereich des Spektrums. Die für diesen Teil des Spektrums relevanten Wellenlängen erstrecken sich vom Ultraviolettbereich bei  $0,1\mu\text{m}$ , über den Bereich des sichtbaren Lichts bei ca.  $0,5\mu\text{m}$  und den Nahinfrarotbereich mit Wellenlängen um  $1\mu\text{m}$ , bis hin zum Ferninfrarotbereich (Wärmestrahlung) bei bis zu  $100\mu\text{m}$ .

Die elektromagnetischen Wellen in diesem Bereich werden auch als Licht bezeichnet. Licht lässt sich zum einen, wie bereits erwähnt, als Welle (Wellenmodell) beschreiben, zum anderen als Photon (Photonenmodell).

Das Photonenmodell basiert auf dem Ansatz von einzelnen Lichtquanten und lässt sich durch die

---

<sup>7</sup> Träger, F.: Handbook of Lasers and Optics (2015), S. 8 ff.

Energie eines Photons  $E_{\text{photon}} = \hbar \cdot \omega$  und den Impuls  $p_{\text{photon}} = \hbar k$  darstellen, wobei  $h = 2\pi\hbar$  der Planckschen Konstante entspricht. Hierzu zählt auch der Photonenspin, welcher sich auf die Wellenpolarität bezieht.

## 2.2 Sichtbares Licht und Nahinfrarot

Ein Lidar-Sensor arbeitet für gewöhnlich im Spektrum des sichtbaren Lichts bzw. des Nahinfrarot (NIR). Daher wird im Folgenden vertieft auf die Eigenschaften des sichtbaren Lichts eingegangen. Diese entsprechen weitestgehend dem des Lichts im Nahinfrarotbereich. Dazu sind zuerst einige wichtige physikalische Größen von Licht im Detail erläutert.

### 2.2.1 Physikalische Größen

#### Strahlungsfluss

Der Strahlungsfluss bzw. die Lichtleistung  $\phi$  beschreibt die Energie in Watt, die von einer Lichtquelle ausgestrahlt wird.<sup>8a</sup> Das Dividieren der Lichtleistung durch die Fläche, auf die der Lichtstrahl fällt, ergibt die Intensität.

#### Intensität

Die Intensität bzw. Flächenleistungsdichte, auch in anderer Literatur Bestrahlungsstärke genannt, spielt bei der Messung von Effekten bei der Interaktion von Licht mit Materie eine wichtige Rolle.<sup>8b</sup> Die Intensität, die durchschnittliche Energie pro Flächen- und Zeiteinheit, einer Lichtwelle mit dem Feldvektor  $E(r, t) = E_0(r) \cdot e^{\pm j\omega t}$  ergibt sich zu

$$I(r) = \frac{c \cdot \epsilon_0}{2} \cdot |E_0(r)|^2, \quad (2-2)$$

wobei  $c$  der Lichtgeschwindigkeit und  $\epsilon_0$  der Dielektrizitätszahl entspricht

#### Leuchtdichte

Die Leuchtdichte oder auch Strahldichte  $L$  ist definiert als

$$L(r) = \frac{\delta^{(2)}\phi}{\cos(\theta)\delta A\delta w}. \quad (2-3)$$

Sie gibt den Strahlungsfluss  $\phi$  in einer bestimmten Raumrichtung  $\theta$  pro Raumwinkel  $\delta w$  und senkrecht zum Sehstrahl projizierter Fläche  $\cos(\theta)\delta A$  an (siehe auch Abbildung 3-2. In der Abbildung

<sup>8</sup> Hecht, E.: Optik (2018). a: S. 111; b: S. 18ff;.



---

entspricht  $\delta A$  der Fläche auf der Oberfläche  $dA$ ). Sie ist damit abhängig vom Raumwinkel, aber nicht von der Entfernung.<sup>9</sup>

## Geschwindigkeit

Bezüglich der Geschwindigkeit des Lichtstrahls gibt es zwei verschiedene Konzepte<sup>10</sup>, die Phasengeschwindigkeit und die Gruppengeschwindigkeit. Die Phasengeschwindigkeit ist definiert als die Ausbreitung von Punkten mit der selben Phase auf einer Wellenfront. Die Gruppengeschwindigkeit ist als die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Energie in einem Wellenpaket definiert.

Die Phasengeschwindigkeit für eine Welle mit der Frequenz  $f$ , der Wellenlänge  $\lambda$  in einem Medium mit dem Brechungsindex  $n$  ist definiert als

$$v_\varphi = \frac{c}{n} = \frac{\lambda}{n} f, \quad (2-4)$$

wobei  $c$  der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum mit  $2.998 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$  entspricht. Für die Lichtgeschwindigkeit gilt der Zusammenhang  $c = \lambda f$ .

Die Gruppengeschwindigkeit ist mit der Dispersion  $k$  definiert als

$$\frac{d\omega}{dk} = v_\varphi \left( 1 - \frac{k}{n} \frac{dn}{dk} \right). \quad (2-5)$$

In einem Medium mit konstantem Brechungsindex sind Phasen und Gruppengeschwindigkeit gleich.

## Absorption

Wenn Licht durch ein Material dringt wird ein Teil absorbiert. Wird eine ebene Lichtwelle mit der Intensität  $I_0$  angenommen, die auf eine Schicht der Dicke  $o$  trifft, ergibt sich die folgende Intensität nach Durchlaufen dieser Schicht<sup>11</sup> zu

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha o}, \quad (2-6)$$

wobei  $\alpha$  die materialspezifische Absorptionskonstante ist.

---

<sup>9</sup> Rothkirch, A.: Systematische Bestimmung der bidirektionalen, spektralen Reflexionsfunktion (2001), S. 6.

<sup>10</sup> Träger, F.: Handbook of Lasers and Optics (2015), S. 18 ff.

<sup>11</sup> Eichler, H.; Eichler, J.: Laser (2015), S. 27.

---

## 2.2.2 Eigenschaften

### Statistische Eigenschaften

Bei einer realen Lichtquelle ist, neben den erwähnten physikalischen Effekten, auch ein statistischer Charakter vorhanden.<sup>12a</sup> Beispielsweise unterliegen Frequenz und Polarisation gewissen Schwankungen. Diese werden jedoch nicht weiter behandelt, da sie in den später implementierten Erweiterungen im Sensormodell nicht berücksichtigt sind.

### Geometrische Eigenschaften

Die grundlegende Gleichung der geometrischen Optik, die auch als Basis für das Konzept der optischen Strahlung dient, ist

$$[\nabla L(r)]^2 = n^2(r), \quad (2-7)$$

wobei  $\nabla$  der Nablaoperator,  $L$  die optische Wellenlänge,  $n$  der Brechungsindex und  $r$  der Positionsvektor ist.<sup>12b</sup> Ein Strahl ist als eine Trajektorie definiert, die senkrecht zu den Wellenfronten steht, d.h. den Oberflächen mit gleicher optischer Wellenlänge  $L$ . Mithilfe der Gleichung 2-7 lässt sich die Strahlengleichung herleiten und ergibt sich zu

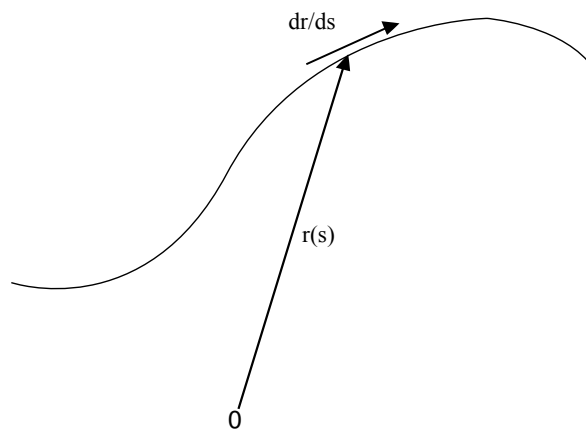
$$r = s \cdot a + p. \quad (2-8)$$

Hier entspricht  $r$  dem Positionsvektor für einen Punkt auf dem Strahl,  $a$  und  $p$  sind konstante Vektoren und  $s$  ist die geometrische Pfadlänge entlang des Strahls. Das bedeutet, dass sich Lichtstrahlen in einem homogenen und isotropen Material geradlinig ausbreiten, wenn Gleichung 2-7 gültig ist.

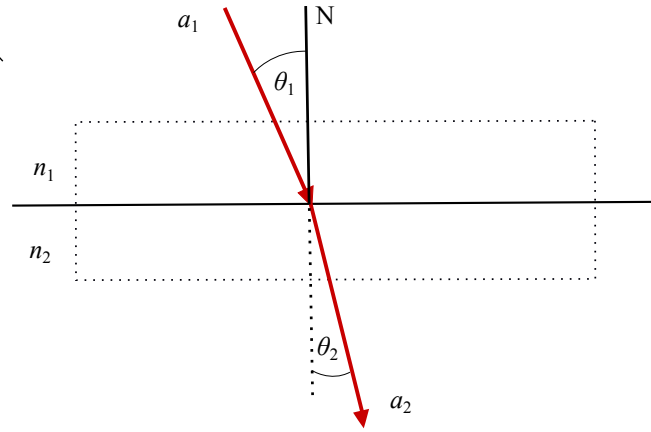
In der folgenden Abbildung 2-1a ist die Strahlengleichung bildlich dargestellt. Es wird ein wellenförmiger Lichtstrahl in einem inhomogenen Material angenommen.  $r(s)$  ist der Positionsvektor eines Punktes auf dem Strahl, wobei  $s$  der Bogenlänge entlang der Kurve entspricht und 0 der Ursprung des Koordinatensystems ist. Dann ist der Vektor  $dr/ds$  ein Einheitsvektor tangential zum Strahl.

---

<sup>12</sup> Träger, F.: Handbook of Lasers and Optics (2015). a: S. 24ff; b: S. 36ff;.



(a) Strahlengleichung<sup>13</sup>



(b) Brechungsgesetz<sup>14</sup>

Abbildung 2-1: Abbildung (a) zeigt die Strahlengleichung. In Abbildung (b) ist das Brechungsgesetz mit dem einfallenden Strahl  $a_1$  und dem ausfallenden Strahl  $a_2$  dargestellt

## Brechung

Trifft ein sich in einem Material mit dem Brechungsindex  $n_1$  befindlicher Lichtstrahl auf eine homogene Grenzfläche zu einem Material mit dem Brechungsindex  $n_2$ , wie in Abbildung 2-1b verdeutlicht, entsteht eine Brechung. Dabei gilt das Brechungsgesetz nach Snellius

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2-9)$$

wobei  $\theta_1$  dem Einfallswinkel und  $\theta_2$  dem Ausfallswinkel entspricht.<sup>15a</sup> Wenn  $n_2$  größer als  $n_1$  ist, existiert immer eine Lösung für  $\theta_2$  wenn  $\theta_1$  gegeben ist. Ist  $n_2$  kleiner als  $n_1$  gibt es einen kritischen Winkel  $\theta_{1,crit}$  der zu einer internen Totalreflexion führt, also zu einem parallel zum Medium führenden Strahl (d.h.  $\theta_2 = \pi/2$ ). Ist  $\theta_1$  größer  $\theta_{1,crit}$  existiert keine Brechung sondern eine Reflexion.

## Reflexion

Das Reflexionsgesetz für eine ebene spiegelnde Fläche lässt sich aus dem Brechungsgesetz nach Snellius<sup>15b, 16</sup> herleiten. Dazu wird der Sonderfall angenommen, dass beide Seiten den gleichen Brechungsindex mit

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = 1 \quad (2-10)$$

<sup>13</sup> Basierend auf Träger, F.: Handbook of Lasers and Optics (2015), S. 38, Abb. 2.2.

<sup>14</sup> Basierend auf Träger, F.: Handbook of Lasers and Optics (2015), S. 41, Abb. 2.4.

<sup>15</sup> Träger, F.: Handbook of Lasers and Optics (2015). a: S. 41; b: S. 41;.

<sup>16</sup> Dohlus, R.: Technische Optik (2015), S. 6.

besitzen. Daraus folgt bei gleichem Brechungsindex, dass  $\theta_1 = \theta_2$  gelten muss. Der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel, damit liegen Einfallsstrahl und Reflexionsstrahl in einer Ebene. Das Reflexionsgesetz gilt für alle reflektierenden Materialien, Wellenlängen und Einbettungsmedien. Je nach Brechungsindex ergeben sich jedoch unterschiedliche Winkel. Die Winkel und Größen entsprechen denen des Brechungsgesetzes in Abbildung 2-1b.

## Strahldivergenz

Verlässt ein Strahl seine Quelle, divergiert er mit zunehmendem Abstand zur Quelle immer weiter auseinander. Der Effekt ist auf die Beugungserscheinungen und den Wellencharakter des Lichts zurückzuführen.<sup>17a</sup> Der sogenannte Divergenzwinkel lässt sich für einen idealen Gauß-Strahl nach Eichler und Eichler<sup>17b</sup> näherungsweise berechnen mit

$$\theta_{\text{div}} = \frac{\lambda}{\pi \omega_{\text{div}}}, \quad (2-11)$$

dabei entspricht  $\omega_{\text{div}}$  dem Radius der Strahltaile, der sich mit Hilfe einer Linse beliebig einstellen lässt und  $\lambda$  der Wellenlänge der Strahlung.

Alternativ ist auch eine Berechnung des Winkels mit Hilfe des Strahlensatzes durch Messen der Strahlaufweitung an zwei verschiedenen Punkten entlang des Strahls möglich. Mit Hilfe des Winkels lässt sich dann die Strahldivergenz näherungsweise über den Tangens an jedem beliebig entfernten Punkt berechnen. Es ergibt sich für die Strahlaufweitung

$$r_{\text{div}} = 2d \cdot \tan\left(\frac{\theta_{\text{div}}}{2}\right), \quad (2-12)$$

wobei  $d$  der Entfernung zum Ursprung und  $\theta_{\text{div}}$  dem vorher beschriebenen Divergenzwinkel entspricht.

Bei Formel 2-12 handelt es sich um eine Näherung, da sich der Lichtstrahl kugelförmig und nicht in Form einer Ebene ausbreitet.

## Einfluss der Atmosphäre und Reflexionsarten

Die von einer Quelle emittierte Lichtleistung  $\phi_0$  unterliegt einer Dämpfung in der Atmosphäre (Transmission). In der folgenden Abbildung 2-2a ist eine Messstrecke der Länge  $l$  in der Atmosphäre vereinfacht dargestellt. Hierbei ist nur der erste Teil abgebildet, nach der Reflexion durchläuft der Lichtstrahl die Messstrecke ein zweites Mal.<sup>18</sup> Ein Teil der Lichtleistung wird durch in der Atmosphäre enthaltene Partikel (z.B. Staub und Wassertropfen von Regen oder Nebel) diffus reflektiert ( $\phi_r$ ), ein weiterer Teil wird absorbiert ( $\phi_a$ ) und in Wärme umgewandelt. Übrig bleibt die Lichtleistung  $\phi_t$ , die auf einen

<sup>17</sup> Eichler, H.; Eichler, J.: Laser (2015). a: S. 1; b: S. 236 - 237;.

<sup>18</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 318-320 und S. 324.

Körper aufrifft und von diesem reflektiert wird.

Je nach Materialeigenschaften des Körpers wird die Lichtleistung nach Fürstenberg und Dietmayer<sup>19</sup> bzw. Winner<sup>20</sup> nicht nur reflektiert, sondern auch absorbiert oder transmittiert. Die Lichtleistung kann beispielsweise beim Auftreffen auf einen lichtdurchlässigen Körper wie eine Glasscheibe transmittiert werden, also sie durchdringen. Alternativ kann sie beim Auftreffen auf eine bestimmte Art von Körper, z.B. ein tief schwarzes Objekt, zum größten Teil absorbiert werden. In beiden Fällen wird nur ein sehr geringer bis hin zu keinem Anteil des Lichts reflektiert.

Im Folgenden wird die Reflexion näher betrachtet, da sie für die im späteren Verlauf beschriebene Erweiterung des Lidar-Sensormodells in Verbindung mit der BRDF eine größere Rolle spielt.

Ist die Oberfläche des (reflektierenden) Körpers optisch rau, d.h. sie besteht aus in verschiedene Richtungen orientierten Flächenelementen, tritt eine diffuse Streuung auf. Abbildung 2-2 (b) zeigt die diffuse Streuung für ein orthogonal (Bild 1) und ein schräg ausgerichtetes Objekt (Bild 4). Das einfallende Licht wird in einem Winkel von  $180^\circ$  gleichmäßig in alle Richtungen zurück reflektiert. Dabei handelt es sich um eine ideale Reflexion. Ein solches Objekt wird auch als Lambert-Reflektor bezeichnet.

Wird die diffuse Streuung durch einen total reflektierenden Anteil überlagert, entsteht eine diffus gerichtete Streuung. Das einfallende Licht wird also nicht in alle Richtungen gleichmäßig gestreut, sondern von einer Richtung dominiert. Dies tritt bei den meisten natürlichen Oberflächen auf. Dies wird als spekulare Reflexion bezeichnet, welche in Abbildung 2-2 (b) Bild (2) & (5) dargestellt ist. Die zurückreflektierte Energie liegt aus diesem Grund in der Praxis im Normalfall nur noch bei 20% oder weniger der ausgesendeten Energie.

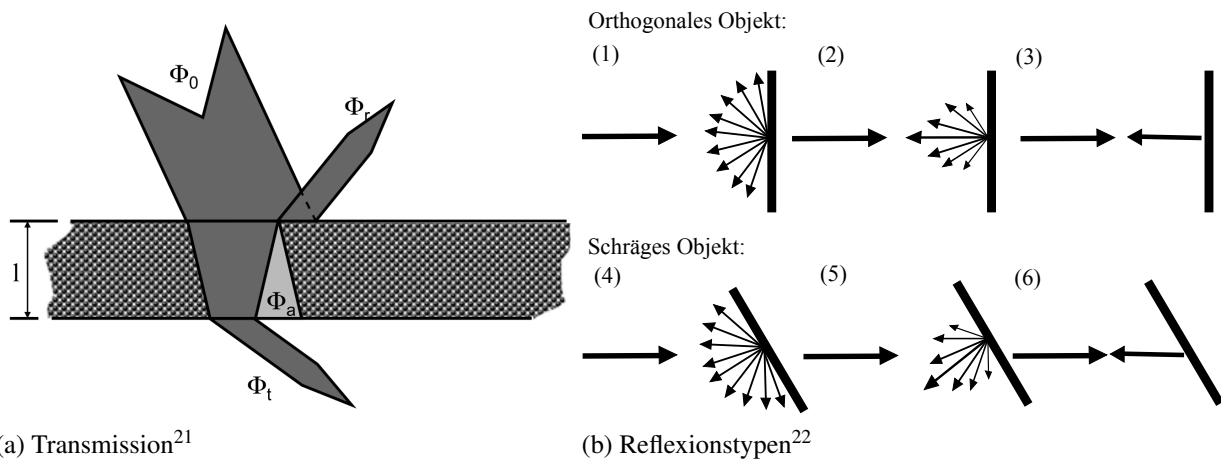


Abbildung 2-2: Abbildung (a) zeigt die Verteilung einer durch eine Quelle abgestrahlten Lichtleistung  $\phi_0$  die durch die Atmosphäre propagiert. In Abbildung (b) ist eine diffuse (1) & (4) und eine gerichtete (2) & (5) Reflexion sowie in (3) & (6) eine Retroreflexion dargestellt.

<sup>19</sup> Fürstenberg, K.; Dietmayer, K.: Fahrzeugumfelderfassung (2004), S. 165.

<sup>20</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 323-324.

<sup>21</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 324, Abb. 18.12.

<sup>22</sup> Basierend auf Fürstenberg, K.; Dietmayer, K.: Fahrzeugumfelderfassung (2004), S. 165, Bild 2

---

Besitzt der Körper eine sehr glatte Oberfläche, verhält sich diese wie ein Spiegel. Ein spiegelnder Körper führt zu einer Totalreflexion des einfallenden Lichts. Er reflektiert das gesamte einfallende Licht in die Richtung, in die er ausgerichtet ist (Einfallswinkel = Ausfallswinkel). Dieser Fall ist in Abbildung 2-2 (b) Bild (3) dargestellt.

Bei Körpern mit retroreflektiven (Rückwärts reflektierenden) Eigenschaften erfolgt wiederum eine Reflexion (unabhängig vom Auftreffwinkel des Lichts) direkt zurück in die Richtung der Quelle. Dabei ist die zurückgestreute Lichtleistung wesentlich größer als bei andern Materialien. Das Verhalten ist in Abbildung 2-2 (b) Bild (3) & (6) dargestellt. Ermöglicht wird dies durch katadioptrische Elemente, die den Lichtimpuls umkehren und in die Richtung der Quelle zurücksenden. Retroreflektive Oberflächen besitzen beispielsweise Rückleuchten und Nummernschilder bei Fahrzeugen oder auch Verkehrsschilder.

### 2.3 Lidar-Sensoren für Automotive-Anwendungen

Lidar steht für Light Detection and Ranging und ist ein optisches Messverfahren, um Objekte zu orten und deren Entfernung im Raum zu messen<sup>23</sup>. Dieses Verfahren arbeitet mit elektromagnetischen Wellen im Bereich des sichtbaren und des infraroten Lichts, im Gegensatz zu Radar, welches im Bereich der Mikrowellen arbeitet. Verwendet werden Lidar-Sensoren in verschiedenen Anwendungsbereichen, wie Gebäude- und Geländevermessung, Satellitenfernerkundung sowie als Sensoren in der Robotik. Als Lichtquelle werden gewöhnlich Laserdioden, die im entsprechenden Spektrum des Lichts emittieren, genutzt. Der Fokus in der vorliegenden Arbeit liegt auf Lidar-Sensoren im Automobilbereich, daher werden diese Sensoren im Folgenden genauer betrachtet.

Im Allgemeinen wird zur Entfernungsmessung auf die Methode der Laufzeitmessung (engl. Time of Flight (TOF)) gesetzt. Hierbei wird die Zeit gemessen, die zwischen dem ausgesendeten und dem vom Zielobjekt reflektierten und wieder empfangenen Lichtimpuls verstreicht. Mit Hilfe der gemessenen Laufzeit und der bekannten Geschwindigkeit des Lichts von  $ca. 3,0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  lässt sich auf die Entfernung zwischen Sensor und Zielobjekt schließen. Berechnet wird die Entfernung mit

$$d = \frac{c \cdot \tau}{2}, \quad (2-13)$$

wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $\tau$  die verstrichene Zeit zwischen Senden und Empfangen des Signals ist.

Mit Hilfe der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs (durch Raddrehzahlsensoren und Lenkwinkel bestimmt) lässt sich dann die Relativgeschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs bestimmen. Die ist durch Differentiation von mehreren Abstandsmessungen zu ermitteln. Grundsätzlich ist auch der Doppler-Effekt nutzbar, allerdings wären hier Komponenten nötig, die im Automobilsektor nicht wirtschaftlich sind. Neben der Abstandsmessung bietet ein Lidar-Sensor-System auch die Möglichkeit einer visuellen Objekterkennung, durch Auswertung der gemessenen zurückgestrahlten Lichtinten-

---

<sup>23</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 318-320.

sität, allerdings weniger genau im Vergleich zu einem Kamerasystem. Die visuelle Auflösung des Sensors ist aktuell größer als beim Radar-Sensor aber kleiner als bei einer Kamera. Auch ist bei Lidar-Sensoren, abhängig von der Ausführung, eine begrenzte Mehrzielfähigkeit vorhanden, also das Detektieren mehrerer Objekte in einer Messung.

Angewendet werden Lidar-Sensoren im Automobilbereich aktuell zur Realisierung von pre-Crash und ACC Funktionalitäten durch Messung von Abstand und Relativgeschwindigkeit. Da sie u.a. eine gewisse visuelle Objekterkennung neben der Tiefenauflösung bieten, zählen sie nach verschiedenen Automobilherstellern und Zulieferern als ein wichtiger Bestandteil für die zukünftige Sensorik des Autonomen Fahrens.<sup>24</sup>

### 2.3.1 Aufbau und Funktionsweise

Der grundsätzliche Aufbau der meisten handelsüblichen Scanner ist nach Winner<sup>25,26</sup> ähnlich. Der Aufbau von Sende- und Empfangszweig ist in der folgenden Abbildung 2-3 schematisch dargestellt.

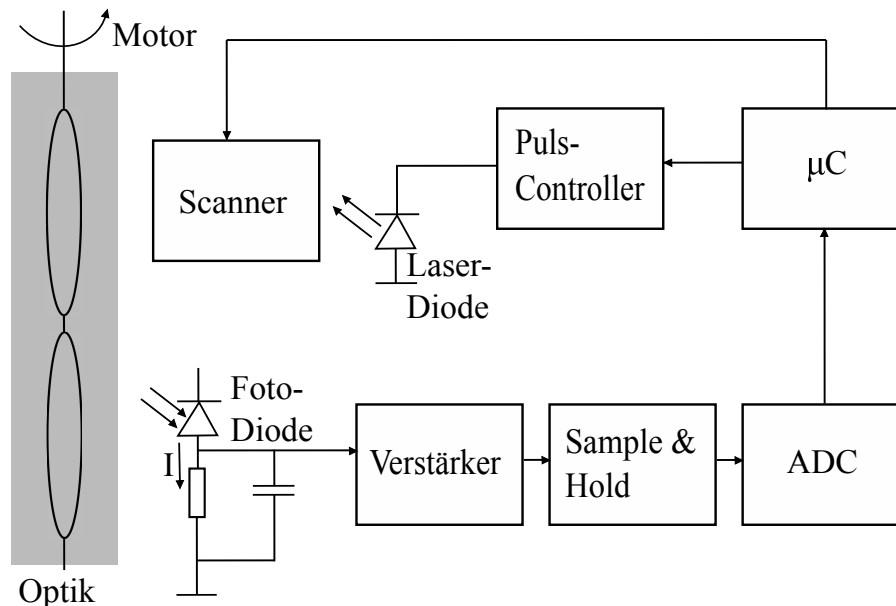


Abbildung 2-3: Schematischer Aufbau des Sende- und Empfangszweiges eines handelsüblichen Lidar-Sensors.<sup>27</sup>

Dargestellt ist im Sendezweig die Laser Diode (Sender), die über einen meist beweglichen Spiegel (Scanner) und über eine Linse (Optik) den Laserstrahl aussendet. Gesteuert wird die Diode über einen Mikrocontroller und den Pulse Controller. Im Empfangsbereich gelangt der reflektierte Laserstrahl durch eine Linse (Optik) auf eine Fotodiode, die ihn in eine Spannung und anschließend mit Hilfe eines Widerstandes  $R$  in einen Strom  $I$  wandelt. Der Strom, bzw. das Signal, wird durch einen

<sup>24</sup> Richarz, H. R.; Kirchbeck, B.: Fahrer Assistenzsysteme Der Weg zum autonomen Fahrzeug (2019).

<sup>25</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 320 ff.

<sup>26</sup> Winner: Mechatronik und Assistenzsysteme im Automobil (2019), S. 4 ff. Kapitel 3-4.

<sup>27</sup> Basierend auf Winner: Mechatronik und Assistenzsysteme im Automobil (2019), Kapitel 3-4, Folie 8.

---

Verstärker geleitet und mittels Sample & Hold und dem Analog / Digital-Wandler (ADC) an den Mikrocontroller übertragen, der das Signal verarbeitet und interpretiert.

Im Sendezweig befindet sich eine Laserquelle, die Licht im Nah-Infrarot Bereich von 850nm - 1000nm emittiert und den Sendeimpuls moduliert. Die Messimpulse werden so kurz wie möglich gehalten, um eine exakte Zieltrennung von mehreren Echos zu gewährleisten. Die Intensität hingegen muss möglichst hoch sein, um bei der Rückstreuung des Laserpulses ein noch messbares Signal zu erhalten. Um diese hohe Abstrahlleistung des Lasers störsicher zu halten, wird die Treiberstufe des Lasers möglichst direkt im Gehäuse des Halbleiterlasers verbaut.<sup>28a</sup>

Die Abstrahlleistung des Sensors darf nicht zu hoch gewählt werden, da sonst bei der Nutzung des Sensors im täglichen Verkehr durch eine zu hohe Intensität des Laserpulses Schäden an den Augen anderer Verkehrsteilnehmer entstehen können. Aus diesem Grund muss der Empfangszweig den mit niedriger Intensität ausgesendeten und zurückgestreuten Impuls robust erkennen können. Beeinflussbar ist die Empfindlichkeit des Empfangszweigs über die Fläche des Sensors, welche jedoch durch die Güte der Optik limitiert wird.

Zum Empfangen werden meist Dioden vom Typ PIN (positive intrinsic negative diode) oder APD (avalanche photo diode) verwendet. Avalanchedioden werden als Photodioden-Halbleiterdetektoren eingesetzt. Sie eignen sich zum Zählen von einzelnen Photonen, hierzu werden sie mit einem großen Vorwiderstand in Sperrrichtung ausgestattet. Mit ihnen sind Messfrequenzen von bis zu 100MHz möglich.<sup>28b</sup> PIN-Dioden sind wegen der dicken i-Schicht (schwach dotiert, leitend, intrinsische Leitfähigkeit) temperaturstabiler und kostengünstiger als die Avalanchedioden, jedoch auch weniger empfindlich.

Die im Empfangszweig verwendeten Fotodioden sind nichtlineare Wandler. Das auf die Fotodiode einfallende Licht mit der Leistung  $P_{\text{Licht}}$  bewirkt bei linearem Anstieg des Lichts eine lineare Steigerung des Stroms. Dies führt zu einer Erhöhung der elektrischen Leistung ( $P_{\text{el}} = U \cdot I^2$ ), proportional zum Quadrat der Lichtleistung. Umgekehrt bedeutet dies, dass eine Halbierung der zurückgestrahlten Lichtleistung eine Viertelung der elektrischen Empfangsleistung bewirkt. Die Konsequenz sind überproportionale Abschwächungen des Empfangssignals durch schwächere Rückstreuungen oder durch weiter entfernte Objekte.

In der folgenden Abbildung 2-4 ist beispielhaft der erzeugte Spannungsverlauf im Empfänger einer einzelnen Messung dargestellt. Mehrere Rückreflexionen sind über die Zeit und über die Distanz (TOF) aufgezeigt. Die drei in Abbildung 2-4 dargestellten Ausschläge (1,2,4) entsprechen jeweils einem detektierten Objekt während einer gewöhnlichen Messung eines Lidar-Sensors im Straßenverkehr. Ausschlag (1) kann beispielsweise eine Pkw-Scheibe sein, die einen Teil des Lichts reflektiert. Der zweite kleinere Ausschlag (2) kann durch einen reflektierenden Wassertropfen aufgrund von Regen oder Nebel entstanden sein. Der letzte Puls (4) kann beispielsweise der Reflektor der Rückleuchte eines Fahrzeugs sein. Die in Abbildung 2-4 dargestellten Größen  $w_A$ ,  $w_B$  und  $w_C$  entsprechen jeweils der Echopulsweite des detektierten Objekts, also der Pulsdauer des zurückgesendeten Signals. Die

---

<sup>28</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015). a: S. 318-320; b: S. 322;.

<sup>29</sup> Basierend auf Ibeo: ibeo LUX 2010(R) Laserscanner Operating Manual (2010), S. 3-7, Abb. 3-6.



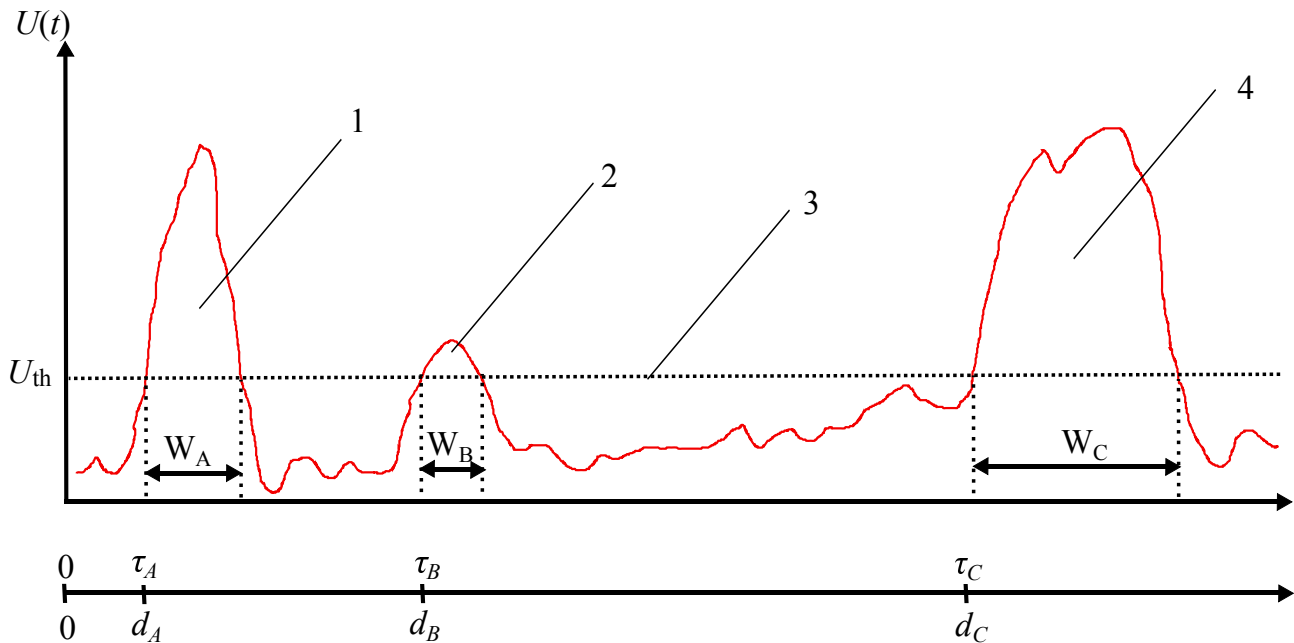


Abbildung 2-4: In der Abbildung ist der Ausschlag der Spannung  $U(t)$  im Empfänger über die Zeit bzw. die Distanz aufgetragen.<sup>29</sup>

Fläche der Pulse (1,2 und 4) entspricht der Intensität des empfangenen Signals.  $U_{th}$  (3) entspricht dem Schwellwert, durch den eine Detektion vom Signalrauschen abgegrenzt wird. Das bedeutet, dass sich diese Grenze nicht leicht definieren lässt, da der Grad zwischen Objekt und einer Störung sehr schmal sein kann.  $\tau_A$ ,  $\tau_B$  und  $\tau_C$  sind die jeweils verstrichenen Zeiten bis zum Wiedereintreffen des Signals im Empfänger. Also der Zeitpunkt, wenn die Intensität des reflektierten Signals hoch genug ist und dadurch die Schwellspannung  $U_{th}$  überschritten wird.<sup>30</sup>

### 2.3.2 Verschiedene Ausführungsvarianten

Der gewünschte Erfassungsbereich der Sensoren kann durch verschiedene technische Varianten abgedeckt werden. Dies ist erforderlich, da die maximale Strahlaufweitung durch die Empfindlichkeit begrenzt ist.<sup>31</sup> Der Unterschied zwischen den Verfahren liegt vor allem in der Art der Aufteilung des Messbereichs. Diese sind in Abbildung 2-5 dargestellt. Eine Möglichkeit ist das Verwenden mehrerer Strahlen, auch Multibeam genannt (siehe Abb. 2-5 (a)). Strahlen können zusätzlich langsam durch einen Spiegel hin und her bewegt werden, um den Sichtbereich weiter zu vergrößern, dies wird als Multibeam Sweep bezeichnet (Abb. 2-5 (b)). Alternativ lässt sich eine Vergrößerung des bestrahlten Bereichs auch mit zwei Sensoren an unterschiedlichen Einbaupositionen erreichen (Multibeam verteilt, Abb. 2-5 (c)). Ein anderer Ansatz ist das schnelle Scannen des Erfassungsbereichs mittels eines einzelnen Strahls (Singelbeam Scan, (d)).

Zusätzlich lässt sich neben dem Azimutwinkel, wie in der Abbildung dargestellt, auch der Elevationswinkel in mehrere Abschnitte aufteilen, um eine bessere Trennfähigkeit zu erreichen. Der Azimut

<sup>30</sup> Ibeo: ibeo LUX 2010(R) Laserscanner Operating Manual (2010), S. 3-7.

<sup>31</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 329 ff..

steht für den horizontalen Winkel in Sensorrichtung und die Elevation für den vertikalen Winkel in Sensorrichtung. Dies lässt sich durch zusätzliche Strahlen für jede weitere Ebene nach dem Prinzip von Abb. 2-5 (a) oder das einzelne bzw. gleichzeitige Scannen jedes vertikalen Abschnittes, zusätzlich zu den horizontalen Abschnitten nach dem Prinzip von Abb. 2-5 (d) umsetzen. Beispielsweise kann dadurch bei mehreren vertikalen Abschnitten besser zwischen Straßenschild und Fahrzeug unterschieden werden.

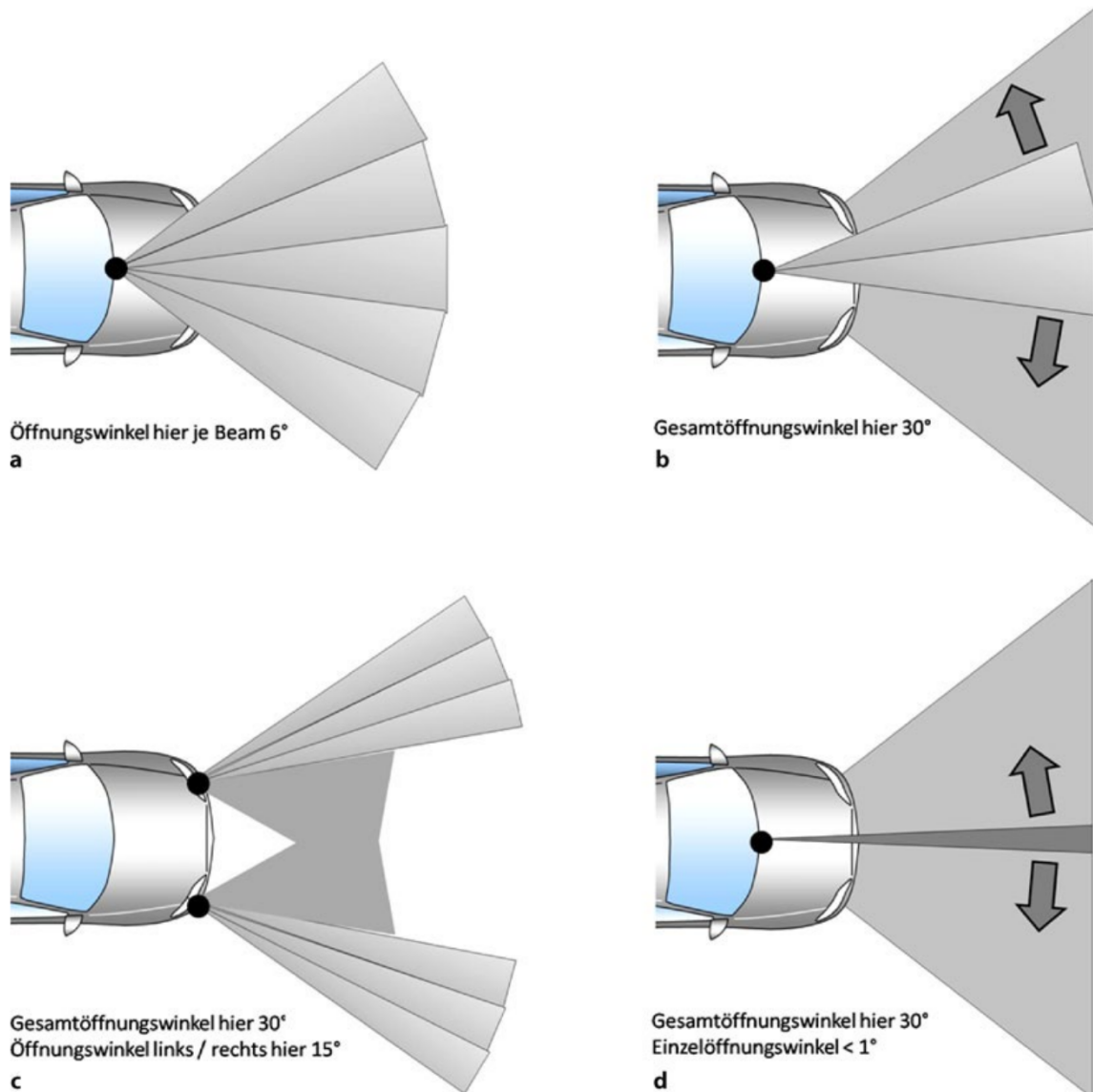


Abbildung 2-5: In der Abbildung sind verschiedene Ausführungsvarianten von Lidar-Sensoren dargestellt. In Bild a ist eine Multibeam Ausführung dargestellt, in b Multibeam mit Sweep, in c Multibeam verteilt und in d ein Scanner mit einem einzelnen Strahl.<sup>32</sup>

<sup>32</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S330, Abb 18.17.

### 2.3.3 Distanzabhängigkeit des gemessenen Signals

Ein weiterer Aspekt ist die Abhängigkeit der zurückgestreuten Energie von der Distanz zwischen Sensor und Zielobjekt. Da sich das vom Sender abgestrahlte Licht in Form eines Kugelausschnitts ausbreitet, nimmt die Sendeleistung mit dem Faktor  $\frac{1}{d^2}$  ab.<sup>33</sup> Die vom Ziel zurückreflektierte Leistung nimmt mit dem selben Faktor ab. Daraus folgt, vorausgesetzt alle anderen Effekte sind vernachlässigbar, dass die Sendeleistung mit  $\frac{1}{d^4}$  proportional zur Empfangsleistung ist.

Trifft der Strahl auf ein Objekt, das in alle Richtungen größer ist als die Breite des Strahls, gilt die Laserradar-Gleichung (Formel 2-14).<sup>34</sup> Für den Aufbau in Abbildung 2-6 ergibt sich die Bestrahlungsstärke am Empfänger zu

$$I = c_{\text{refl}} \cdot \frac{\phi_0}{\phi^2 \cdot \sin^2(\chi) \cdot d^4} A \cos(\eta) \cos(\gamma). \quad (2-14)$$

wobei  $c_{\text{refl}}$  die Reflexivität des Gegenstandes,  $\phi_0$  die Sendeleistung,  $\chi$  die Strahldivergenz des Laserpulses,  $\gamma$  der Einfallswinkel auf dem Empfänger,  $\eta$  der Einfallswinkel auf dem Gegenstand und  $d$  die Distanz zum Gegenstand und  $A$  als Querschnittsfläche des Laserpulses mit  $A = \sin^2(\chi)d^2$ .

Veranschaulicht wird dies in Abbildung 2-6. Hier sind die für die Laser-Radar-Gleichung wichtigen Winkel anhand eines Beispiels mit einem Sender / Empfänger und einem streuenden Gegenstand dargestellt, die sich in der Distanz  $d$  voneinander befinden.

Mit der Annahme, dass das bestrahlte Objekt ein Retroreflektor ist, vereinfacht sich die Formel zu

$$I = c_{\text{refl}} \frac{\phi_0}{\phi^2 d^2}. \quad (2-15)$$

Bei einem solchen Reflektor wird für jeden Einfallswinkel des Lichts die Energie annähernd vollständig zurück in Richtung Quelle reflektiert. Daraus folgend lässt sich für andere Oberflächen bei beliebigem Einfallswinkel eine Annäherung mit

$$I = c_{\text{refl}} \frac{\phi_0}{\phi^2 d^2} \geq I = c_{\text{refl}} \frac{\phi_0}{\phi^2 d^2} \cos(\eta). \quad (2-16)$$

treffen. Damit lässt sich ableiten, inwieweit die bestrahlte Oberfläche einem Retroreflektor entspricht.

<sup>33</sup> Winner: Mechatronik und Assistenzsysteme im Automobil (2019), S. 9, Kapitel 3.4.

<sup>34</sup> Fürstenberg, K.; Dietmayer, K.: Fahrzeugumfelderfassung (2004), S. 166.

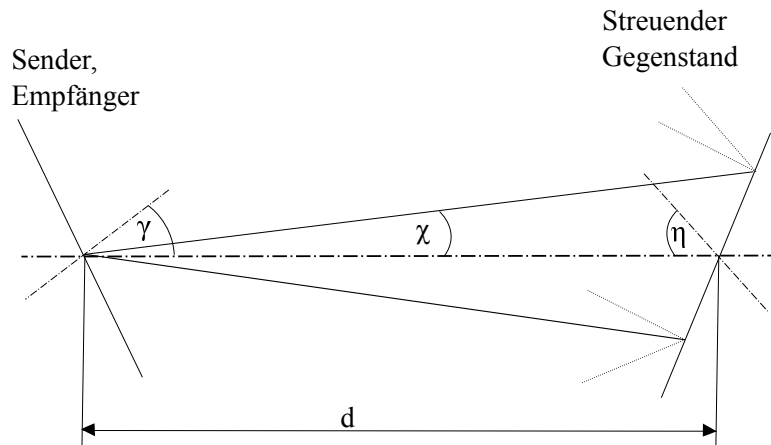


Abbildung 2-6: Die Grafik stellt die für die Laser-Radar Gleichung wichtigen Größen optisch dar.<sup>35</sup>

Tabelle 2-1 zeigt bildlich, wie sich die Entfernung eines Objektes auf die zurückreflektierten Strahlen auswirkt. Je weiter sich ein vorausfahrendes Fahrzeug vom Sensor entfernt, desto weniger Reflexionen werden vom Empfänger detektiert. Damit wird die Detektion durch den Sensor, ob es sich um ein relevantes Objekt handelt, schwieriger. Im Gegensatz dazu kann das Objekt auf einem herkömmlichen Kamerabild noch eindeutig identifiziert werden. Die in Tab. 2-1 angegebenen Distanzen können nicht verallgemeinert werden, sondern unterscheiden sich je nach Sensortyp.

Tabelle 2-1: Die Abbildung verdeutlicht die mit der Entfernung sukzessive abnehmende Anzahl an detektierten Reflexionen durch den Sensor.<sup>36</sup>

Segment				
Videobild				
Distanz	10 m	18 m	42 m	79 m

### 2.3.4 Charakteristische Eigenschaften von Lidar-Sensoren

Lidar-Sensoren besitzen aufgrund ihrer Bauweise und ihres Messprinzips spezifische Eigenschaften und damit Vor- und Nachteile. Diese sind im Folgenden kurz zusammengefasst nach Winner<sup>37, 38</sup>:

<sup>35</sup> Fürstenberg, K.; Dietmayer, K.: Fahrzeugumfelderfassung (2004), S. 166, Bild 3.

<sup>36</sup> Basierend auf Fürstenberg, K.; Dietmayer, K.: Fahrzeugumfelderfassung (2004), S. 166, Bild 4.

<sup>37</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 318-324.

<sup>38</sup> Winner: Mechatronik und Assistenzsysteme im Automobil (2019), S. 5-9, Kapitel 3-4.

---

## Kosten

Aufgrund der geringen Laufzeit von Licht zwischen Sensor und Zielobjekt werden zur Distanzbestimmung präzise Zeitmessungen benötigt. Beispielsweise muss bei einem 50m entfernten Objekt die Laufzeit mit 333 ns bestimmbar sein. Instrumente für eine sehr präzise Zeitmessung verursachen Kosten und machen damit aktuell die Anschaffung eines Lidar-Sensors im Vergleich z.B. zu einer Kamera weniger wirtschaftlich.

## Mehrzielfähigkeit und Dopplereffekt

Eine Mehrzielfähigkeit, also die Erfassung mehrerer Zielobjekte ist durch einen Lidar-Sensor prinzipiell möglich. Dies ist einerseits jedoch durch die geringe Mehrwegausbreitung eines Lasers begrenzt. Wobei sich die Mehrwegausbreitung hier auf die mehrfache Reflexion des Laserstrahls an verschiedenen Objekten bezieht, bis der Strahl wieder auf den Sensor trifft. Die Mehrzielfähigkeit basiert vielmehr auf einer Detektion von mehreren Objekten, durch einen Lichtstrahl auf Basis der Strahlaufweitung oder der Transmissionseigenschaften eines Körpers (z.B. eine Glasscheibe). Der Dopplereffekt wäre auch beim Lidar nutzbar, allerdings aufgrund der benötigten hohen zeitlichen Auflösung nicht wirtschaftlich für den Automobilmarkt.

## Atmosphäre und Wetter

Die Transmission durch die Atmosphäre spielt wie bereits erwähnt für die Systemauslegung von Lidar-Sensoren eine Rolle. Die Atmosphäre wird wiederum durch ihre Bestandteile beeinflusst. Grund für den Einfluss ist die doppelte Messstrecke bei aktiven Messverfahren, wie dem Lidar-Sensor, da die Strahlung aktiv vom Sensor ausgesendet und der zurückgestreute Anteil gemessen wird.

Beispielsweise werden aufgrund der Wellenlänge des Lichtstrahls, die sich in der Größenordnung von Regentropfen befindet, bei Regen, Schnee und Nebel einige Pulse reflektiert oder gar absorbiert. Dies kann zu fehlerhaften Erkennungen von Objekten oder zur Übersättigung des Sensors führen. Heutige Sensoren besitzen eine dynamische Anpassung ihrer Empfindlichkeit, wodurch sich der Einfluss reduzieren lässt. Bei starkem Schneefall oder Starkregen kann der Sensor trotzdem ausfallen oder nur noch mit verminderter Reichweite arbeiten.

Sonnenlicht ist im Allgemeinen ein beherrschbarer Störfaktor. Dies ändert sich bei einem direkten Einfallswinkel des Lichts in den Sensor. Da im Spektrum des Sonnenlichts auch Komponenten mit der Wellenlänge des Sensors enthalten sind, führt dies zu einer Blendung und kann zum vollständigen Ausfallen führen. Hiergegen gibt es keinen effektiven Schutz. In der Praxis wird dies jedoch aufgrund der speziell nötigen Konstellation und variabler Schnellwertbildung der Detektion nur sehr selten beobachtet.<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup> Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 319,321,324.

---

## **Mechanik**

In Lidar-Sensoren sind bewegliche Komponenten wie Spiegel und Motoren verbaut. Die Mechanik dieser kann Abnutzungserscheinungen zeigen, sie sind damit eine Schwachstelle. Es gibt erste Versuche, diese Komponenten mittels MEMS umzusetzen und damit in den Sensor zu integrieren.<sup>40</sup>

## **Augensicherheit**

Um in jedem Fall eine Sicherheit der Augen der Verkehrsteilnehmer gewährleisten zu können, wird die maximale Energie eines einzelnen Laserpulses stark begrenzt. Lidar-Sensoren dürfen die Laserklasse 1 nicht überschreiten. Dies führt zu Einschränkungen bei der Reichweite des Sensors und einem reduzierten Signal-zu-Rausch Verhältnis. Durch eine stärkere Bündelung des Strahls kann diese Einschränkung teilweise umgangen werden, bleibt aber einer der limitierenden Faktoren eines Lidar-Sensors.

## **Reflexion**

Bei bestimmten Einfallswinkeln und Oberflächeneigenschaften von Körpern kann es bei stark gebündelten Strahlen zu Totalreflexionen kommen. Dies führt zu nicht mehr detektierbaren Objekten, da kein Signal mehr zurück zum Empfänger gespiegelt wird (vgl. Abschnitt 2.2.2 Reflexion).

## **Verschmutzung**

Da der Großteil des reflektierten Lichts von retroreflektiven Objekten, wie Rücklichtern, Nummernschildern, Verkehrsschildern stammt, kann dies bei Verschmutzung zu einer reduzierten Reichweite bei der Erkennung führen.

Die Verschmutzung des Sensors selbst wiederum führt auch zu einer reduzierten Empfindlichkeit, bis hin zu einem Ausfallen bestimmter Sektoren. Dieses Problem lässt sich durch Reinigungsvorrichtungen oder eine weniger starke Bündelung des Strahls reduzieren. Auch kann die Blende der Optik des Empfangssensors weiter geöffnet werden, denn das Problem besteht für den Sende- und den Empfangszweig.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup> Reeb, W.; Härter, H.: Der Status quo von Lidar in selbstfahrenden Autos (2019).

<sup>41</sup> Pacala, A.: The Dead bug Problem (2019).

---

### 3 Lidar Modellbildung

---

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Lidar-Modellbildung umfasst eine Abbildung der von einem Lidar-Sensor ausgesendeten und empfangenen Strahlung sowie verschiedene Einflüsse, die auf die gesendete Strahlung wirken.

In diesem Kapitel sind verschiedene Typen von Lidar-Modellen beschrieben und das aktuell bei FZD entstehende Modell eingeordnet. Es folgt eine Darstellung verschiedener Einflüsse auf die gesendete und empfangene Strahlung. Dazu werden die im vorherigen Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Effekte, welche auf einen Lidar-Sensor wirken, zusammengefasst, um weitere ergänzt und bezüglich ihrer Relevanz für die Modellbildung bewertet.

Um nach der Beschreibung der Grundlagen von Lidar-Sensoren in Kapitel 2 ein Verständnis der Lidar-Modellbildung zu erlangen, folgt eine Einführung in das Raytracing-Verfahren (Strahlverfolgung). Auf diesem basieren verschiedene in der Literatur beschriebene Lidar-Modelle, wie auch das in dieser Arbeit erweiterte. Es wird die Funktionsweise, der später implementierten Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF) erklärt, die zur Modellierung von Reflexionseigenschaften von Körpern dient. Sie ist neben dem Raytracing ein elementarer Teil des zu erweiternden Modells.

Danach wird ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand bei der Lidar-Modellbildung gegeben. Der Fokus liegt nachfolgend auf bereits bestehenden Lidar-Modellen und die Implementierungen der vorher beschriebenen Effekte. Mit der angeschlossenen Diskussion sollen letztlich die Effekte mit dem größten Verbesserungspotential für das Lidar-Modell definiert werden. Diese priorisierten Effekte werden im folgenden Kapitel 4 durch Versuche genauer untersucht. Anschließend folgt eine Darstellung des gesamten zukünftigen Lidar-Sensormodells, welches am Fachgebiet entwickelt wird, um im Verlauf der Arbeit die implementierten Effekte einordnen zu können.

#### 3.1 Lidar-Modelle

Nach Rosenberger et al.<sup>42</sup> und wie in Kapitel 1 dargestellt gibt es verschiedene Ansätze für die Modellierung von umgebungserfassenden Sensoren. Diese finden bereits Anwendung in virtuellen Simulationsumgebungen.

Ein idealer Sensor, ohne Berücksichtigung jeglicher Effekte und Einflussfaktoren, stellt einen Ansatz mit dem geringsten Aufwand dar. Das Modell besitzt einen idealen Messbereich und kann nur die exakte Position und Orientierung eines Objekts in der simulierten Umgebung darstellen. Auf diesem Typ basiert das in dieser Arbeit zu erweiternde Modell bei FZD.

Eine andere Kategorie von Sensormodellen sind phänomenologische Sensormodelle. Zu ihnen gehören stochastische und physikalische Sensormodelle. Stochastische Sensormodelle basieren auf probabilistischen oder statistischen Ansätzen zur Modellierung von beobachtbaren Effekten. Die Komplexität eines solchen Sensormodells ist nur geringfügig höher als bei einem idealen Sensormodell. Es lassen sich unter anderem Fehlererkennungen (Falsch Positiv und Falsch Negativ), Rauschen, atmo-

---

<sup>42</sup> Rosenberger, P. et al.: Towards a Generally Accepted Validation Methodology (2019).

---

sphärische Dämpfung, Sensorverschmutzung und Sensormanipulationen abbilden.

Im Gegensatz dazu sind physikalische Modelle, die auf Gleichungen basieren und damit Effekte im Detail beschreiben, beliebig komplex. Sie modellieren beispielsweise Effekte wie die Signalausbreitung sowie Reflexion, Transmission, Absorption des gesendeten Strahls und die Beugung und Brechung dieser an Objekten. Mögliche Spezifikationen eines solchen Sensormodells sind Wellenlänge, Material und Oberflächeneigenschaften sowie Signalverarbeitung.

Neben der Einteilung nach idealen oder phänomenologischen Modellen kann auch eine Gliederung nach dem technischen Verfahren erfolgen auf dem das Modell basiert. Neben dem in Abschnitt 3.3 im Detail beschriebenen Raytracing-Ansatz, also der Verfolgung eines Lichtstrahls in einer virtuellen Umgebung, existieren auch andere. Als Beispiel sei hier der sogenannte Z-Buffer erwähnt<sup>43</sup>. Dieser wird auch als Depth-Buffer (deutsch Tiefen-Puffer) bezeichnet. Er ist die natürliche Tiefeninformation bei protektiver Bildsynthese. Der Ansatz basiert darauf, dass ein Lidar-Sensor sehr effizient durch die „Pipeline“ von Grafikkarten simulierbar ist. Der Z-Buffer, der für die Verdeckungsberechnung beim Bild rendern gebraucht wird lässt sich auch als Tiefenkarte speichern. Diese beinhaltet die Tiefeninformationen des Bildes relativ zum Kamera-Sensor.

Mit dieser Information ist es möglich, die Strahlen und deren Interaktion mit der Szene zu rekonstruieren, die denen des Lidar-Sensors an der Position der Kamera entsprechen. Der Nachteil des Verfahrens verglichen mit dem Raycasting ist der nötige weitere Abtastungsschritt zum Übertragen der Strahlen des Lochkameramodells zu denen des Lidar-Modells. Wird jedoch eine Überabtastung genutzt, ist der Fehler vernachlässigbar und es besteht die Möglichkeit, die Strahlaufweitung mit zu berücksichtigen. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Z-Buffer wegen der begrenzten Auflösung ungenau ist (heutzutage 24 oder 32 Bit). Es entsteht ein sogenanntes „Stiching“ wenn zwei Objekte sehr nah beieinander sind, das bei Raytracing prinzipbedingt ausgeschlossen ist.

Das in der Arbeit erweiterte ideale Modell ist in der Kategorie der phänomenologischen Sensormodelle auf Basis des Raytracing-Verfahrens einzuordnen.

### **3.2 Zusammenfassung bekannter, auf einen Lidar-Sensor wirkenden Effekte**

Es gibt bereits einige Arbeiten zur Identifizierung und Bewertung der auf ein Lidar-Sensormodell wirkenden Effekte und Parameter in Bezug auf die Modellbildung. Diese werden im Folgenden nach Rosenberger et al.<sup>44</sup> zusammengefasst. Sie sind im Folgenden nach Umweltparametern und nach sensorspezifischen Parametern gegliedert.

Ein wichtiger Umweltparameter für die möglichst detailgetreue Abbildung eines realen Lidar-Sensors sind die Transmissionseigenschaften der Atmosphäre. Hierzu zählt unter anderem die Sensorverschmutzung und die atmosphärische Dämpfung, Effekte wie Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit

---

<sup>43</sup> Rosenberger, P. et al.: Benchmarking and Functional Decomposition of Automotive Lidar Sensor Models (2019), S. 636.

<sup>44</sup> Rosenberger, P. et al.: Analysis of Real World Sensor Behavior (2018).



---

und wetterbedingte Einflüsse. Zu letzteren zählen Regen, Nebel und verschiedene Arten von Schnee. Auch Abgase von Fahrzeugen beeinflussen u.a. die Transmissionseigenschaften der Atmosphäre.

Der zweite Umweltparameter bezieht sich auf die Berücksichtigung der unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Materialien. Zur Berücksichtigung dieser Eigenschaften im Sensor-Modell wird beispielsweise eine Look-Up Tabelle welche die Materialien und deren Eigenschaften beinhaltet oder die in Abschnitt 3.4 etwas detaillierter beschriebene BRDF verwendet.

Ein weiterer Umweltparameter ist der Einfluss von Umgebungslicht, da insbesondere Sonnenlicht einen Infrarot-Anteil besitzt. Wenn es zusätzlich zu dem vom Sensor ausgesendeten Infrarotlicht in den Sensor fällt, reduziert es das Signal-zu-Rausch Verhältnis (engl. Signal to Noise Ratio (SNR)), was vor allem bei niedrigem Sonnenstand zu einem Blenden des Sensors führt.<sup>45</sup>

Neben den Umweltparametern ist ein weiterer wichtiger Faktor die sensorspezifischen Parameter. Hierzu zählen Eigenschaften des Sensors die sich durch dessen Bauweise ergeben. Es sind dies die Anzahl der Layer, die Abtastfrequenz, der Blickwinkel, die Reichweite und die Auflösung des Sensors. Ein weiterer Aspekt ist die ggf. unterschiedliche Ausgabe von Orientierung und Position zwischen Modell und Sensor.

Sensoren unterscheiden sich bei der Anordnung der Scan-Layer, beispielsweise welche Winkelbereiche welcher Layer abdeckt. Weitere sensorspezifische Parameter sind die Genauigkeit, das Rauschverhalten und die Strahlaufweitung. Auch bei der Messgröße unterscheiden sich die Sensoren je nach Ausführungsvariante. Beispielsweise lässt sich die Intensität oder die Echopulsweite als Messgröße verwenden. Ein Punkt sind auch Effekte wie Motion Blur und Rolling Shutter, die bei Objekten auftreten, welche sich während des Scannens bewegen. Beide haben die Gemeinsamkeit, dass sie für eine falsche Form und Größe der aufgenommenen Objekte sorgen.

### **3.3 Grundlagen der Stahlverfolgung als Ansatz zur Lidar-Modellbildung**

Mit Hilfe des Verfahrens der Stahlverfolgung (engl. Raytracing) lässt sich wie in Kapitel 3.1 beschreiben ein Lidar-Sensor modellieren, da das Funktionsprinzip des Lidar-Sensors und das des Raytracings sich ähneln.

#### **3.3.1 Raytracing**

Strahlverfolgung bzw. Raytracing ist nach Schiele<sup>46</sup> und Glassner<sup>47</sup> ein Verfahren, um aus einer dreidimensionalen Welt ein zweidimensionales Bild zu generieren, eine Bildsynthese. Es basiert auf dem bekanntesten Modell einer Kamera, dem Lochkameramodell. Beim Lochkameramodell wird sich das Abbilden eines Objekts so vorgestellt, dass die Punkte aus der realen Welt durch ein kleines Loch in die Kamera und auf die Bildebene projiziert werden. Dieses wird für die digitale Bildverarbeitung modifiziert und im Folgenden näher beschrieben. Die aus Pixeln bestehende Bildebene verschiebt

---

<sup>45</sup> Rosenberger, P. et al.: Analysis of Real World Sensor Behavior (2018).

<sup>46</sup> Schiele, H.-G.: Computergrafik für Ingenieure (2012), S. 269ff.

<sup>47</sup> Glassner, A. S.: An Introduction to Ray-Tracing (1991), S. 5ff.

sich vor das Kameraloch, dieses wird wiederum in Koordinatenursprung bzw. Kamerazentrum (engl. Eye) umbenannt. Dies geschieht, um das auf den Kopf stellen des Objekts zu vermeiden.

Um ein (digitales) Bild zu generieren wird im Allgemeinen aus der einfallenden Strahlung berechnet, welche Farbe jedes Pixel zugewiesen bekommt. Hier wird angenommen, dass durch das „Loch“ Lichtstrahlen auf ein Pixel fallen und sich z.B. mit Hilfe des Mittelwerts die Farbe des Pixel berechnen lässt. Um diese Lichtstrahlen zu erhalten, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine davon ist das Forward Raytracing, bei dem angenommen wird, dass Photonen eine Lichtquelle verlassen und man diese dann auf ihrem Weg durch die 3D-Welt verfolgt, um festzustellen, ob sie auf die Bildebene des Kameramodells treffen. Bei ihrem Weg werden sie beispielsweise beim Treffen auf Objekte reflektiert und dadurch umgeleitet.

Der gesamte Prozess des Raytracings ist in der nachfolgenden Abbildung 3-1 dargestellt. Es ist aufgezeigt, wie ein beispielhafter Strahl vom Kamerazentrum ausgesendet wird und über ein Pixel der Bildebene auf ein Objekt trifft. Wenn der Strahl zuvor kein Hindernis getroffen hat ist der getroffene Punkt am Objekt vom Kamerazentrum aus sichtbar. Vom Objekt wird er eventuell reflektiert und kann im weiteren Verlauf auf eine Lichtquelle treffen. Trifft der Strahl nun auf eine Lichtquelle ist das Objekt beleuchtet und damit sichtbar.

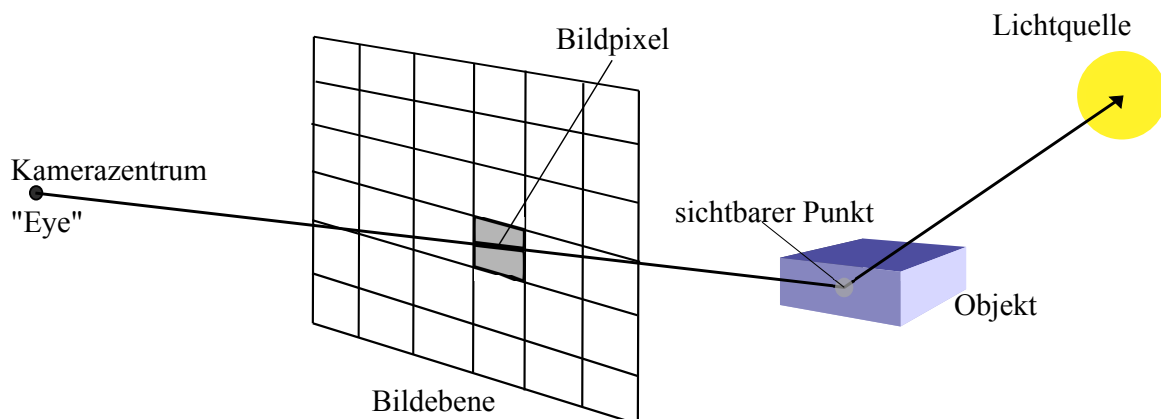


Abbildung 3-1: Beispielhafter Verlauf eines Lichtstrahls beim Raytracing.<sup>48</sup>

Mit Hilfe der Flächen- und Materialeigenschaften des Objekts lässt sich berechnen, wie und ob der Strahl reflektiert wird und ob er dadurch in seinem weiteren Verlauf auf eine Lichtquelle trifft. Dies geschieht mit einer erneuten Strahlverfolgung, die beliebig oft wiederholbar ist. Da im realen Fall aufgrund der Dämpfung des Lichts in der Atmosphäre und beim Auftreffen auf ein Objekt die Intensität des Lichtstrahls immer weiter abnimmt, ist jedoch nur eine beschränkte Anzahl an Wiederholungen sinnvoll.

Genutzt wird gegenüber dem Forward-Raytracing jedoch meist das Backwards-Raytracing, welches auch im Sensormodell des Fachgebiets verwendet wird. Dies geschieht zurzeit jedoch nur mit Einschränkungen, da der Weg zurück zum Sensor noch nicht berechnet wird. Beim Backwards-Raytracing wird das Forward-Raytracing Verfahren letztlich umgedreht. Der Strahl wird, wie in Ab-

<sup>48</sup> Basierend auf Bungartz, H.-J., Griebel, M.; Zenger, C.: Einführung in die Computergraphik (2002), S. 135, Abb. 3.14

---

bildung 3-1 dargestellt, von der Kamera aus abgesendet, trifft auf ein Objekt und anschließend wird überprüft, ob er im weiteren Verlauf auf eine Lichtquelle trifft. Ein Vorteil ist, dass nur die relevanten Strahlen berechnet werden müssen, also nur diejenigen, die in die Bildebene treffen bzw. diese verlassen. Dies macht das Verfahren deutlich ressourcenschonender. Es wird überprüft, ob diese Strahlen in ihrem Verlauf auf eine Lichtquelle treffen, falls nicht sind sie irrelevant.

### 3.3.2 Raycasting

Raycasting ist eine vereinfachte Version des Raytracings und lässt sich als dessen Vorläufer<sup>49</sup> ansehen. Der Unterschied zwischen Raycasting und Raytracing ist, dass der Strahl nur bis zum ersten Schnittpunkt mit einem Objekt verfolgt wird. Eine weitere mögliche Strahlinteraktion wird nicht berechnet. Dadurch sind neben den Mehrfachreflexionen, also dem Spiegeln oder Reflektieren auf andere Objekte auch Effekte wie Transmission und Absorption des Strahls ausgeschlossen. Aktuell wird beim Lidar-Modell des Fachgebiets aufgrund der Komplexität der Strahlinteraktion auf eben dieses Raycasting gesetzt. Die Vernachlässigung der Strahlinteraktion ist als erste Näherung möglich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es, wie beim sichtbaren Licht, weniger spekulare als diffuse reflektierende Oberflächen gibt. Insbesondere da der Lichtstrahl im Fall des Lidar-Sensors tatsächlich von der Bildebene ausgeht. In der weiteren Entwicklung des Lidar-Modells sollte die Strahlinteraktion jedoch nicht vernachlässigt werden, um die Genauigkeit des Modells weiter verbessern zu können.

### 3.3.3 Raytracing Framework: Nvidia OptiX

Um das Raytracing für die Simulation nutzen zu können, gibt es bereits Frameworks und Bibliotheken von verschiedenen Herstellern. Das sich am Fachgebiet in Entwicklung befindliche Lidar-Sensormodell basiert auf der Raytracing-Engine OptiX der Firma Nvidia, welches bereits in der verwendeten Simulationsumgebung integriert ist. OptiX stellt nach Parker et al.<sup>50</sup> und Linnhoff<sup>51</sup> die grundlegende Funktionalität der Strahlverfolgung, also das Senden eines Strahls und das Detektieren von Objekttreffern durch diesen in einem virtuellen Raum zur Verfügung.

Mit Hilfe eines Programms zur Strahlgenerierung wird jeder Strahl einzeln mittels seiner Eigenschaften, wie Senderichtung und Ursprung, erstellt. Anschließend wird der Strahl durch die Funktion `rtTrace` gesendet. Diese Funktion bildet den Kern des Programms, da sie in einer Schleife zwischen dem Detektieren eines Schnittpunktes mit einem Objekt und der entsprechenden Reaktion darauf alterniert. Beim Treffen auf ein Objekt wird unterschieden in Closest Hit, Any Hit und Miss. Closest Hit wird beim zum Sensor nächsten Treffer ausgelöst, Any Hit bei jedem Treffer und Miss, falls keine Interaktion mit der Umgebung bis zur vorgegebenen maximalen Distanz detektiert wird. Je nach Typ wird eine entsprechende Programmroutine (Hit-Programm) gestartet. Jeder verschickte Strahl ist mit einer vom Nutzer definierten Datenstruktur verknüpft, dem sogenannten Payload. In ihm ist beispielsweise die Distanz zwischen Ursprung und getroffener Objekt gespeichert. Er wird durch das erwähnte

---

<sup>49</sup> Schiele, H.-G.: Computergrafik für Ingenieure (2012), S. 185 und S. 206ff.

<sup>50</sup> Parker, S. G. et al.: OptiX TM: A General Purpose Ray Tracing Engine (2010).

<sup>51</sup> Linnhoff, C.: Entwicklung eines Radar-Sensormodells (2018), S. 21.

---

Hit-Programm gefüllt. Im Hit-Programm lassen sich unter anderem auch weitere Strahlen aussenden, um Reflexionen zu simulieren.

Die gesamte Szene mit den darin enthaltenen Objekten und Eigenschaften wird in einem Szenengraph gespeichert. Zusätzlich ist darin auch gespeichert, wie die räumlichen Beziehungen der Objekte zu einander sind.

Um mit anderen Teilen des Programms kommunizieren zu können bzw. um die Ergebnisse abzuspeichern, werden global definierte Puffer (engl. buffer) verwendet. Bei Verwendung kompatibler Hardware lassen sich die Programmschritte parallelisieren, so werden beispielsweise mehrere Strahlen (engl. Rays) gleichzeitig losgeschickt (und nicht nur einer nach dem anderen). Dies bietet sich an, da alle Strahlen unabhängig voneinander sind. Es führt zu einem Geschwindigkeitsgewinn. Um dies zu gewährleisten, bietet OptiX domänenspezifische Compiler und die Programmierplattform CUDA um die parallelisierbaren Berechnungen auf dem Grafikprozessor durchzuführen. Grafikprozessoren eignen sich aufgrund ihrer Funktionsweise optimal für parallele Berechnungen.

### 3.4 Simulation der Reflexionseigenschaften von Oberflächen

Eine Möglichkeit, um die Reflexionseigenschaften von Oberflächen abzubilden, bieten die Bidirektionalen Reflexionsverteilungsfunktionen (BRDF). Die nachfolgende Beschreibung basiert auf den sich ergänzenden Quellen Shell<sup>52</sup>, Gebhardt<sup>53a</sup> und Rothkirch<sup>54</sup>.

An einer Oberfläche treten neben Absorptionen insbesondere Reflexionen auf, wie eine diffuse, diffus gerichtete oder eine spekulare. Abhängig sind diese von verschiedenen Eigenschaften der Oberfläche und der einfallenden Strahlung wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben.

Wird eine Oberfläche von einer Lichtquelle aus einer beliebigen Raumrichtung bestrahlt, wird die einfallende Strahlung gestreut und reflektiert. Eine BRDF beschreibt die Leuchtdichte der reflektierten Strahlung in Richtung des ausfallenden Winkels. Gegeben ist die BRDF durch

$$f_{\text{BRDF}}(\theta_r, \theta_i, \phi_i, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)}{L_i(\theta_i, \phi_i)d\Omega_i} \text{ in } \frac{1}{\text{sr}}, \quad (3-1)$$

wobei  $L_r$  der von der Oberfläche reflektierten Leuchtdichte und  $L_i$  die einfallende Leuchtdichte einer Quelle ist. Der Index  $i$  bezeichnet die einfallenden Größen, der Index  $r$  die ausfallenden Größen. Die beiden Leuchtdichten sind jeweils abhängig von den in Abbildung 3-2 dargestellten Winkeln  $\phi$  und  $\theta$ . Der Raumwinkel  $\Omega$  ist definiert als

$$d\Omega = \cos(\theta)d\omega \quad (3-2)$$

---

<sup>52</sup> Shell, J. R.: Bidirectional Reflectance An Overview (2004).

<sup>53</sup> Gebhardt, N.: Einige BRDF Modelle (2019). a: -; b: -.

<sup>54</sup> Rothkirch, A.: Systematische Bestimmung der bidirektionalen, spektralen Reflexionsfunktion (2001).

bzw. lässt sich auch darstellen als

$$d\Omega = \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi. \quad (3-3)$$

Abbildung 3-2 zeigt die genannten Winkel  $\phi$ ,  $\theta$  und  $\Omega$ . Hier entspricht das Flächenelement  $dA$  der bestrahlten Fläche auf einem Objekt (vgl. Abschnitt 2.2.2)

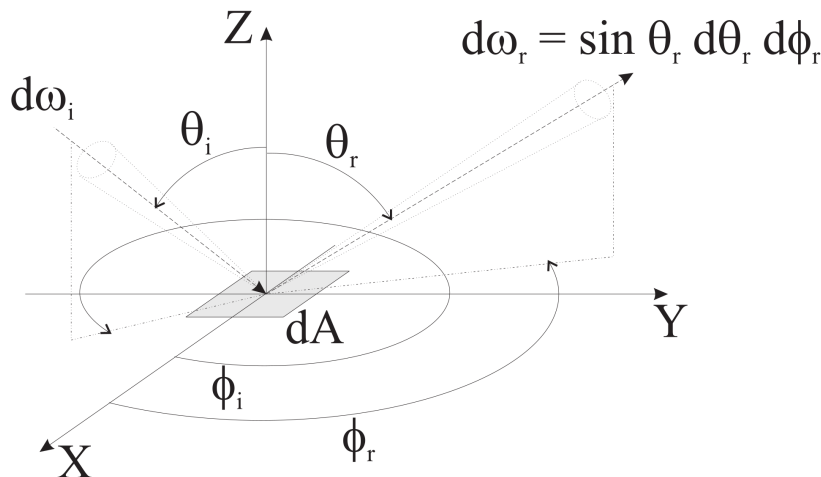


Abbildung 3-2: Darstellungen der verschiedenen Raumwinkel bei der Bestrahlung einer Oberfläche durch einen Lichtstrahl.<sup>55</sup>

### 3.4.1 Eigenschaften und Klassen

Um physikalische Grundsätze (wie z.B. Energieerhaltung) richtig darzustellen, müssen BRDF's nach Gebhardt<sup>53b</sup> bestimmte Eigenschaften besitzen. Zum einen muss die Helmholtz-Reziprozität erfüllt sein. Die besagt, dass sich bei einem Vertauschen des Ein- und Ausfallswinkel der Wert der BRDF nicht ändern darf. Zum anderen muss die Energieerhaltung gegeben sein. Die Energieerhaltung besagt, dass die Summe des in alle Richtungen reflektierten Lichtes nicht größer sein darf als das vorher eingestrahlt Licht. Sie muss allerdings nicht gleich sein, da ein Teil des Lichts absorbiert werden kann. Eine weitere Eigenschaft ist die Superposition zwischen zwei Lichtstrahlen. Diese besagt, dass sich zwei Strahlen, die auf den gleichen Punkt auf einer Oberfläche treffen, nicht beeinflussen dürfen.

Ferner lassen sich BRDFs in zwei verschiedene Klassen einteilen, den BRDF's für isotropische und für anisotropische Oberflächen. Eine Oberfläche ist isotrop, wenn sich beim Drehen der Oberfläche die Intensität des Lichtes an einem Punkt für den Betrachter nicht verändert. Dies tritt z.B. an Oberflächen aus Plastik auf. Bei anisotropischen Oberflächen verändert sich die Intensität jedoch je nach Betrachtungswinkel. Zu beobachten ist dies beispielsweise an Oberflächen aus gebürstetem Metall oder Haaren.

<sup>55</sup> Rothkirch, A.: Systematische Bestimmung der bidirektionalen, spektralen Reflexionsfunktion (2001), S.6, Abb. 2.1

---

### 3.4.2 BRDF-Modelle

Zum Repräsentieren der Oberflächeneigenschaften eines Materials in einer BRDF gibt es zwei Möglichkeiten nach Gebhardt<sup>56</sup>. Eine davon ist, die Eigenschaften eines Materials aus verschiedenen Blickwinkeln zu messen und dann zwischen diesen Werten zu interpolieren. Alternativ wird ein theoretisches Modell, das die Eigenschaften aus der Realität approximiert, gebildet. Es werden zwei Klassen von Modellen unterschieden:

- Empirische Modelle basieren auf einer Formel mit anpassbaren Parametern. Diese bestehen meist nur zum Teil aus physikalisch messbaren Parametern. Die übrigen Parameter bestehen aus Variablen, die das Modell an die gemessenen Werte anpassen.
- Theoretische Modelle besitzen nur Parameter mit physikalischer Bedeutung, die zumindest theoretisch messbar sind.

In der Literatur sind verschiedene Modelle zu finden, die sich meist in ihrer Genauigkeit und Komplexität voneinander unterscheiden. Als Beispiel werden hier nur die bekanntesten Modelle, das Phong-Modell und das Lambert-Modell genannt, welche diffus reflektierende Oberflächen beschreiben. Das Phong-Modell eignet sich zur Darstellung des Glanzeffektes von Körpern, ist aber nicht physikalisch basiert und berücksichtigt damit unter anderem den Energieerhaltungssatz nicht.

### 3.5 Stand der Technik zur Lidar-Modellbildung

Nachdem nun verschiedene Elemente der Modellbildung beschrieben und die für einen Lidar-Sensor relevanten Effekte in Abschnitt 3.2 zusammengefasst sind, folgt der Stand der Technik mit einem Überblick der entwickelten Lidar-Sensormodelle und modellierten physikalischen Effekte.

Zur Simulation von wetterbedingten Einflüssen sind in der Literatur verschiedene Ansätze vorhanden. Beispielsweise wird von Goodin et al.<sup>57</sup> der Einfluss von Regen auf Lidar-Sensoren untersucht. Daraus ist ein Ansatz zur Vorhersage des Einflusses für Lidar-Sensoren im Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)-Bereich entwickelt. Dies basiert auf einem mathematischen Modell, das den Leistungsrückgang des Lidars als Funktion der Regenrate berechnet.

Ein anderer Ansatz von Berk et al.<sup>58</sup> zur Simulation von Regen setzt auf ein stochastisches Simulationsframework, das auf einer probabilistischen Erweiterung einer durch die Autoren entwickelten Lidar-Gleichung basiert. Diese dient zur Abschätzung der Reichweite eines Lidar-Sensors bei unterschiedlichen Wetterbedingungen. Schließlich wird das probabilistische Modell, das spezifische Parameter von Regen verwendet, kombiniert mit der Mie-Theorie und der Theorie zur Signal-Detektion im Simulationsframework angewendet. Ziel dieser Arbeit ist die Möglichkeit, das Sensordesign in einem Entwicklungsstand anzupassen, wenn ein physikalisches Testen noch nicht möglich ist.

---

<sup>56</sup> Gebhardt, N.: Einige BRDF Modelle (2019).

<sup>57</sup> Goodin, C. et al.: Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS (2019).

<sup>58</sup> Berk, M. et al.: A Stochastic Physical Simulation Framework (2019).

---

Andere Ansätze zur Modellierung von Sensoren im Automobilbereich sind nicht parametrische Ansätze, wie beispielsweise von Hirsenkorn et al.<sup>59</sup> beschrieben. In der Arbeit wird ein statistisches Framework für einen Radar-Sensor entwickelt, um dessen Ausgabe zu reproduzieren. Der Ansatz ist laut den Autoren in der Lage, Entfernung, Verdeckung, Latenz, Geisterobjekte und Objektverluste zu modellieren, ohne sie explizit zu programmieren.

In der Arbeit von Plagemann et al.<sup>60</sup> wird ein nicht parametrischer Ansatz verwendet, der „Gaussian beam processes“ genannt wird. Er wird für die Modellierung von Entfernungsmessern bei mobilen Robotern eingesetzt. Hierbei wird die Abstandsmessung als nicht parametrisches bayesisches Regressionsproblem angesehen und mit Hilfe eines Gausschen Prozesses gelöst. Der Hauptvorteil ist laut Autor, die Fähigkeit über mehrere Abstandsscans direkt zu generalisieren. Dadurch lässt sich auf die Verteilung der Abstandsmessung durch einige wenige Scans schließen.

Mit Blick auf die Strahlaufweitung und das Strahlmuster sind in der Literatur verschiedene Arbeiten vorhanden. In einer Arbeit von Pentek et al.<sup>61</sup> wird ein „Unsicherheits-Vorhersagemodell“ für die Messung von mehrstrahligen Lidar-Sensoren entwickelt. Es basiert auf klassischen Techniken zur Vorhersage von Unsicherheiten und wird für einen Velodyne VLP 16 Sensor entwickelt. Dabei ist die Strahlaufweitung und das Strahlmuster, das durch die Laserdiode des Sensors erzeugt wird, mit einbezogen.

Von Goodin et al.<sup>62</sup> wird die VANE genannte Simulationsumgebung vorgestellt. Nach Angabe der Autoren ist sie physikbasierend, besitzt eine hohe Wiedergabetreue und liefert realitätsnahe simulierte Sensordaten. Das dort neben einem Kameramodell implementierte Lidar-Sensormodell basiert auf Raytracing und berücksichtigt die Strahlaufweitung. Es wird ein Strahl durch mehrere einzelne Strahlen simuliert, die durch eine Bildebene geleitet werden. Das Modell berücksichtigt auch die Distanzverluste bei der Intensität durch ein Gaußsches Strahlenprofil. Neben einigen optischen Eigenschaften zur Parametrisierung des Modells, wie Intensität und Strahlaufweitung, lässt sich auch der Empfänger durch Länge, Breite und spektrale Empfindlichkeitskurven parametrisieren.

Bezüglich des Strahlmusters gibt es auch weitere Arbeiten, die sich aber nicht mit Sensoren für den Automobilsektor beschäftigen. Beispielsweise ist nachgewiesen, dass das Strahlmuster eines Lidar-Sensors einen signifikanten Einfluss auf die Positionierung des Punktes hat. In Studien von Sheng<sup>63</sup> sowie Zhang und Shen<sup>64</sup> wird die Strahlgröße eines Lidars daher durch ein Gaußsches Strahlenmodell dargestellt. Diese Arbeiten beschäftigen sich mit Lidar-Sensoren für Erdobservation. Eine weitere Arbeit von Lichti und Gordon<sup>65</sup> beschäftigt sich mit dem Fehler durch Strahlaufweitung bei terrestrischen Lidar-Sensoren. Es werden probabilistische Modelle für Winkelunsicherheiten getestet. Der Fehler der Strahlaufweitung wird durch eine zusätzliche Winkelunsicherheit von einem Viertel des Strahls berücksichtigt.

---

<sup>59</sup> Hirsenkorn, N. et al.: A Non-Parametric Approach for Modeling Sensor Behavior (2015).

<sup>60</sup> Plagemann, C. et al.: A Nonparametric Bayesian Measurement Model for Range Finders (2007).

<sup>61</sup> Pentek, Q. et al.: Developing a predictive model for multi-beam lidars (2018).

<sup>62</sup> Goodin, C. et al.: Sensor Modeling for the Virtual Autonomous Navigation Environment (2009).

<sup>63</sup> Sheng, Y.: Quantifying the Size of a Lidar Footprint: A Set of Generalized Equations (2008).

<sup>64</sup> Zhang, Y.; Shen, X.: Quantitative Analysis on Geometric Size of Lidar Footprint (2014).

<sup>65</sup> Lichti, D. D.; Gordon, S. J.: Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds (2004).

---

Es gibt auch bereits gewerblich angebotene Simulationsumgebungen, die Lidar-Sensormodelle beinhalten. Diese unterscheiden sich in ihren Ansätzen und ihrer Genauigkeit. Beispielsweise berücksichtigt das Modell der Fa. IPG Automotive<sup>66</sup> neben der atmosphärischen Dämpfung, nach eigenen Angaben, auch Farb-, Material- und Oberflächeneigenschaften. Außerdem ist in diesem auf Raytracing basierendem Ansatz auch die Strahlaufweitung berücksichtigt. Diese wird durch Überabtastung, also das Aufteilen eines Strahls in mehrere einzelne simuliert.

Die Fa. Vires Automotive verfolgt einen ähnlichen Ansatz. Im Lidar-Modell werden für jeden „realen“ Strahl zusätzliche Strahlen ausgesendet, um die Strahlaufweitung zu simulieren. Material und Oberflächeneigenschaften sind mit Hilfe einer BRDF berücksichtigt.

Das von der Firma ESI durch Mokrane Hadj-Bachir vorgestellte Modell<sup>67</sup> berücksichtigt die Strahlaufweitung sowie die Transmissionseigenschaften der Atmosphäre bei unterschiedlichen Wetterbedingungen, von Sonnenschein bis zu Nebel und Regen. Der Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Daten liefert, laut Aussage der Autoren, gute Ergebnisse. Es wird beispielsweise zur Simulation eines durch Rauschverhältnisse variierenden Signals eine Funktion, die abhängig von der Distanz zwischen Sensor und Objekt sowie dessen Material ist, genutzt. Auch bei Nebel wird ein ähnlicher Ansatz verwendet, wobei die Funktion abhängig von der Distanz und der Sichtbarkeit des Nebels ist. Bei der Simulation von Regen werden Tropfengröße und Menge berücksichtigt.

Versuche mit verschiedenen Lidar-Sensoren wurden beispielsweise von David Kohanbash<sup>68</sup> durchgeführt. Dabei liegt der Fokus unter anderem auf dem Strahlmuster der Sensoren, den Auswirkungen von direkter Sonneneinstrahlung und Regen. Die Versuche wurden zwar nicht mit Blick auf die Simulation der Sensoren durchgeführt, könnten für das spätere entwickelte Modell jedoch trotzdem hilfreich sein.

### 3.6 Diskussion des Stands der Technik

In Abschnitt 3.5 sind Arbeiten und Ansätze, die sich mit der Modellierung von Effekten und Eigenschaften von Lidar-Sensoren beschäftigen, dargestellt. Jedoch setzen einige der beschriebenen Modelle auf die Annahme von idealen, infinitesimalen Lichtstrahlen, wie auch das am Fachgebiet verwendete ideale Sensormodell. Andere setzen auf eine reine Überabtastung zur Simulation der Strahlaufweitung. Die Überabtastungen arbeiten bei den beschriebenen Modellen mit einer geringen Anzahl an Strahlen und berücksichtigten nicht die unterschiedlichen Eigenschaften der Sensoren. Hier sei beispielsweise das Modell von Fa. Vires oder das von Wang et al.<sup>69</sup> vorgestellte Modell, welches mit vier Strahlen arbeitet genannt.

Ein weiterer Punkt ist, das nur eins der genannten Modelle, das der Autoren Pentek et al.<sup>70</sup>, bei Implementierung der Strahlaufweitung das spezifische Strahlenmuster eines Sensors berücksichtigt. Dieses basiert jedoch auf einem anderen Ansatz, dem Unsicherheits-Vorhersagemodell und bezieht sich nur

---

<sup>66</sup> IPG-Automotive: New Sensor Model, Lidar RSI (2019).

<sup>67</sup> Mokrane Hadj-Bachir, P. d. S.: LIDAR sensor simulation in adverse weather condition (2019).

<sup>68</sup> Kohanbash, D.: LIDAR (Laser Scanner) Review Comparisons (2014).

<sup>69</sup> Wang, S. et al.: Shader-based Sensor Simulation (2012).

<sup>70</sup> Pentek, Q. et al.: Developing a predictive model for multi-beam lidars (2018).



auf einen Sensor.

Da zum aktuellen Stand wenig Forschungsarbeiten bzgl. der Strahlaufweitung und dem spezifischen Strahlmuster von Lidar-Sensoren im Automobilbereich öffentlich verfügbar sind, werden die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche insbesondere auf die Untersuchung und den Vergleich dieser Strahlmuster verschiedener Lidar-Sensoren und deren Strahlaufweitung abzielen. Die Ergebnisse zum Strahlmuster und der Strahlaufweitung werden dann anschließend in das ideale Sensormodell implementiert.

Die Strahlaufweitung ist nach den Ergebnissen von Rosenberger et al.<sup>71 72</sup> einer der größten Einflussfaktoren für das Erreichen eines möglichst realistischen Sensormodells. Dies ist insbesondere durch die schon bei wenigen Metern ergebende Ausdehnung des Lichtstrahls begründet.

### 3.7 Aufbau des Lidar-Modells am Fachgebiet

Im Folgenden wird ein Überblick über das sich am FZD in der Entwicklung befindende Lidar-Sensormodell gegeben. In Abbildung 3-3 ist die komplette Struktur des Modells dargestellt, wie es der Modellentwurf vorsieht. Das in diesem Abschnitt beschriebene Modell umfasst alle bereits vorhandenen, aber auch zukünftig geplanten Komponenten. Ziel des Modells ist es auf Basis der Strahlverfolgung das Verhalten von realen Lidar-Sensoren in der Simulation möglichst genau nachzubilden.

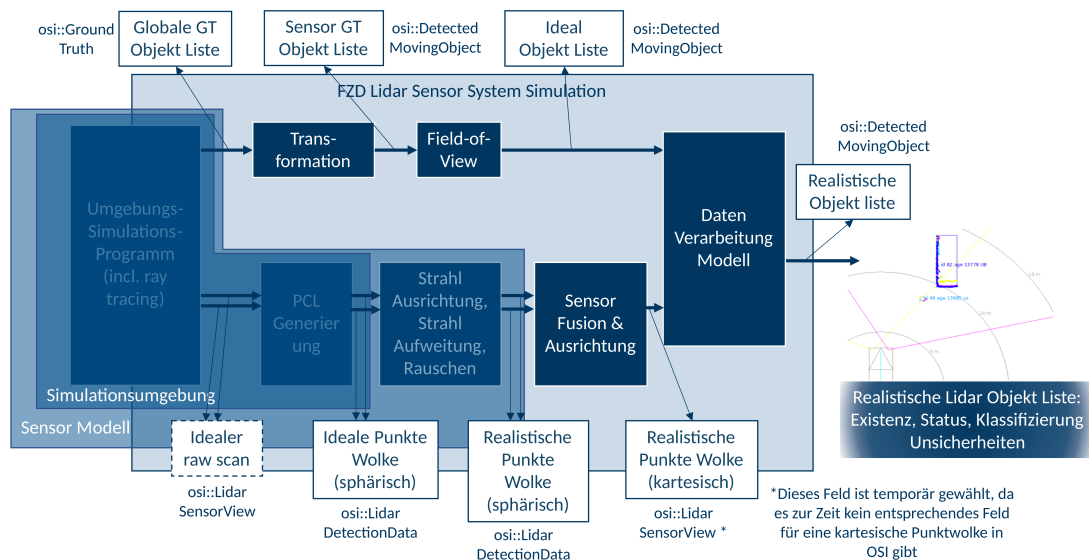


Abbildung 3-3: Aufbau und Zusammensetzung des gesamten Lidar-Sensormodells bei FZD als Blockdiagramm.

<sup>71</sup> Rosenberger, P. et al.: Benchmarking and Functional Decomposition of Automotive Lidar Sensor Models (2019).

<sup>72</sup> Rosenberger, P. et al.: Towards a Generally Accepted Validation Methodology (2019).

---

Das gesamte Modell ist modular aus einzelnen Komponenten aufgebaut. Teil des Sensormodells ist eine austauschbare Bewegungs- und Umgebungssimulation, im Folgenden Simulationsumgebung genannt. Diese setzt wie in Abschnitt 3.3.3 bereits beschrieben auf die Raytracing Engine Nvidia OptiX.

In der Simulationsumgebung lässt sich durch verschiedenste Objekte wie Bäume, Häuser und Straßen etc. eine möglichst realitätsnahe virtuelle Umgebung aufbauen. In dieser modellierten Umgebung lassen sich anschließend individuelle Szenarien erstellen. Dies geschieht durch Platzieren von (beweglichen) Objekten, wie beispielsweise Fußgängern und Pkws, für die unter anderem eine fest definierte Route vorgebar ist, auf der sie sich bewegen. In dieser virtuellen Umgebung wird durch das Raytracing ein Datensatz (idealer Raw Scan) erzeugt, der die Distanz- und Intensitätswerte der einzelnen Strahlen (Rays) beinhaltet. Beim Raw Scan sind somit keine Physikalischen oder sensorspezifischen Einflüsse berücksichtigt.

Im nächsten Modul wird aus dem vom Raytracing stammenden idealen Raw Scan eine (ideale) Punktwolke generiert. Diese enthält alle zuvor durch das Raytracing detektierten Punkte mit den entsprechenden Koordinaten im Raum. Anschließend folgt das Einbeziehen von physikalischen Effekten und Störfaktoren wie Rauschen, Strahlaufweitung und Strahlausrichtung und einer daraus resultierenden realistischen Punktwolke. Hierbei sei bereits erwähnt, dass die im Folgenden vorgenommene Implementierung der Strahlaufweitung nicht in diesem Modul durchgeführt wird, sondern bereits im Modul Punktwolken-Generierung (PCL-Generierung). Die weitere Verarbeitung geschieht wie angegeben.

Nicht mehr Teil des Sensormodells ist eine anschließend folgende Sensordatenfusion aus beispielsweise mehreren Lidar-Sensoren und einer Umwandlung in kartesische Koordinaten. Im Anschluss folgt das Data-Processing Modell, das als Ausgabe eine realistische Objektliste beinhaltet. Neben diesem Prozess wird noch zusätzlich aus der Simulationsumgebung mit Hilfe einer Transformation und dem bekannten Sichtbereich (Field of View (FOV)) der Sensoren eine ideale Objektliste generiert, die als Ground Truth dient. Jeder Verarbeitungsschritt bietet die Möglichkeit der Ausgabe der Daten in einem spezifischen Format des Open Simulation Interface (OSI).

Das Open Simulation Interface ist eine Schnittstelle, die eine Verknüpfung von Fahrsimulations-Frameworks zur Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen ermöglicht. Mit Hilfe der Schnittstelle sollen automatisierte Fahrfunktionen an beliebige Simulationsumgebungen angebunden werden können. Gleichzeitig lassen sich unterschiedliche Sensormodelle integrieren. Dadurch vereinfacht sich die Integration und verbessert damit die Nutzbarkeit von virtuellen Testumgebungen.<sup>73</sup> Der aktuelle Stand des Modells ermöglicht eine Ausgabe der durch die Simulationsumgebung erzeugten Daten an OSI. Der Anwender steuert daher den gesamten Simulationsprozess über die Simulationsumgebung. Ziel ist es, wie zuvor beschrieben die Simulationsumgebung durch OSI anzusteuern und zu konfigurieren.

---

<sup>73</sup> Pegasus: Open Simulation Interface (2017).

---

## 4 Versuche zur Untersuchung der zu implementierenden Effekte

---

In das bestehende Lidar-Modell am Fachgebiet sollen weitere Aspekte, die sich beim Senden und Empfangen der Strahlung zeigen sowie auf die ausgesendete Strahlung wirken, implementiert werden. Die im Rahmen dieser Arbeit als relevant bewerteten Aspekte sind insbesondere das Strahlmuster und die Strahlaufweitung, die Korrelation zwischen den Messgrößen Intensität und Echopulsweite, sowie die Mehrzielfähigkeit des Sensors (s. Abschnitt 3.6). Um diese genauer zu untersuchen werden insgesamt sechs verschiedene Versuche durchgeführt. Ziel ist es, die Erkenntnisse aus den Versuchen anschließend in das Sensormodell zu integrieren.

In Versuch 1 wird mit Hilfe einer Infrarotkamera das Strahlmuster und die Strahlaufweitung der am Fachgebiet zur Verfügung stehenden Lidar-Sensoren untersucht. Versuch 2, 3 und 4 untersuchen das Verhalten bzw. die Reaktion der zwei Messgrößen Intensität und Echopulsweite bei verschiedenen Zuständen wie z.B. unterschiedlich gut reflektierende Materialien. In den Versuchen 5 und 6 erfolgt eine Untersuchung der Mehrzielfähigkeit von Lidar-Sensoren.

In diesem Kapitel sind Planung, Durchführung und Ergebnisse der Versuche beschrieben. Dazu folgt zuerst eine detaillierte Beschreibung und Untersuchung der verwendeten Lidar-Sensoren anhand der vom Hersteller zur Verfügung gestellten Datenblätter. Auch sind die genutzten Messinstrumente und Geräte, sowie die Räumlichkeit beschrieben. Es folgt eine Darstellung des generellen Aufbaus aller Versuche. Anschließend werden Ziele, Durchführung und Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen erläutert. Im Anschluss werden die Ergebnisse in Bezug auf die Implementierung in das bestehende Sensormodell am Fachgebiet diskutiert.

### 4.1 Messsysteme und Versuchsumgebung

Die in den Versuchen verwendeten Lidar-Sensoren und Messgeräte sowie die Räumlichkeit sind im Folgenden beschrieben. Einige der beschriebenen Lidar-Sensoren können nicht in jedem Versuch eingesetzt werden, da sie teils nicht zur Verfügung stehen.

#### 4.1.1 Verwendete Lidar-Sensoren

##### Ibeo Lux 2010

Der Lux 2010 der Firma Ibeo Automotive GmbH ist ein Lidar Sensor zur Nutzung in Fahrzeugen. Die erste Version stammt aus dem Jahr 2009. Er besitzt vier übereinander angeordnete Scan-Ebenen (Scan-Layer) zur kontinuierlichen Umgebungsvermessung.<sup>74</sup> Jeder der vier Layer besitzt seine eigene Empfangseinheit, die für jeweils einen bestimmten vertikalen Winkelbereich zuständig ist. Das Abscannen der Umgebung in horizontalen Ebenen wird durch einen rotierenden Spiegel (Prisma) ermöglicht. Mit Hilfe des Winkels des Spiegels lässt sich dann auf die Lage eines detektierten Objekts schließen. Dabei werden immer zwei Ebenen gleichzeitig gescannt (1, 2 und 3, 4).

---

<sup>74</sup> Ibeo: ibeo LUX 2010(R) Laserscanner Operating Manual (2010).

---

Der Sensor besitzt eine begrenzte Mehrzielfähigkeit. Für jeden ausgesendeten Laserpuls können laut Hersteller bis zu drei Echos registriert werden. Durch die vier Layer bietet der Sensor auch eine Pitch-Winkel Kompensation, das Ausgleichen der Schräglage des Fahrzeugs.

Bei der Scan-Frequenz lässt sich zwischen 12,5 Hz, 25 Hz und 50 Hz wählen. Je nach gewählter Frequenz variiert die Winkelauflösung des Sensors. Bei 12,5 Hz ist eine Auflösung von 0,125° im zentralen Messbereich von ±10° möglich. Im mittleren Messbereich (±30°) sind 0,25° und im lateralen Messbereich (+50 bis −50°) 0,5° möglich. Bei einer Frequenz von 25 Hz sind in allen Bereichen 0,25° möglich, bei 50 Hz 0,5°. Der Sensor besitzt damit einen gesamten horizontalen Messbereich von 110°, allerdings sind Teile dieses Messbereichs nur durch zwei Ebenen abgedeckt und nicht durch alle vier. Im Bereich von 50° bis 35° sind nur die zwei unteren Layer (1 und 2) im Einsatz, im Bereich von 35° bis −50° alle vier Layer und im Bereich von −50° bis −60° nur die zwei oberen Layer (3 und 4). Der vertikale Messbereich liegt bei 3,2° bzw. in den Randbereichen bei 1,6°.

Das Messprinzip ist, wie bei dieser Kategorie von Sensoren üblich, die Time of Flight Messung. Als Messgröße dient die Echo-Pulsweite, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben. Eine Ausgabe der Intensität wird durch den Sensor nicht unterstützt.

Von den Sensoren stehen bei FZD drei Modelle zur Verfügung. Zwei der Sensoren stammen aus der Baureihe Lux 4 und einer aus der Baureihe Lux 1. In den Herstellerangaben sind keine Unterschiede zwischen den Baureihen dokumentiert.

Für die Versuche relevante Eigenschaften des Sensors sind im Folgenden detaillierter beschrieben.

Das Strahlmuster (engl. Beampattern) des Ibeo-Lux ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Bei einer Scan-Frequenz von 12,5 Hz und einer Winkelauflösung von 0,25° beträgt die tatsächliche Auflösung zwischen einem Layer laut Hersteller 0,5°, das Doppelte der nominalen Auflösung. Die Strahldivergenz beträgt in der Horizontalen 0,08° und in der Vertikalen 0,8°. Über die Winkel lassen sich beispielsweise für eine Entfernung von 11 m näherungsweise, wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, mit

$$x = d \cdot \tan(\phi) \quad (4-1)$$

die Abstände zwischen den einzelnen Strahlen und deren Größe berechnen. Dabei entspricht  $x$  dem gewünschten Wert,  $\phi$  dem Winkel und  $d$  der Distanz zwischen Sensor und Objekt. Die sich ergebenden Abstände und Größen für 11 m sind in Abbildung 4-1 dargestellt. Die zeitliche Strahldivergenz lässt sich mit Hilfe der vom Hersteller angegebenen Daten nicht direkt berechnen. Bei der zeitlichen Strahldivergenz handelt es sich um die Aufweitung des Strahls durch die Rotation des Spiegels oder der Diode. Da die Diode nicht infinitesimal kurze Lichtimpulse sendet, dreht sich der Lichtstrahl immer ein Stück weiter, während die Diode leuchtet. Dadurch wird ein gewisser Bereich mehr ausgeleuchtet.

Der Hersteller gibt nur eine einzelne Pulsdauer des Sensors an, welche 4,5 ns beträgt. Da der Sensor pro Strahl vermutlich mehrere Lichtpulse sendet und die Anzahl dieser nicht angegeben ist, lässt sich mit Sicherheit nur die zeitliche Strahlaufweitung eines Pulses berechnen. Bei einer Frequenz von

---

<sup>75</sup> Basierend auf Ibeo: ibeo LUX 2010(R) Laserscanner Operating Manual (2010), S. 3-14, Abbildung 3-12

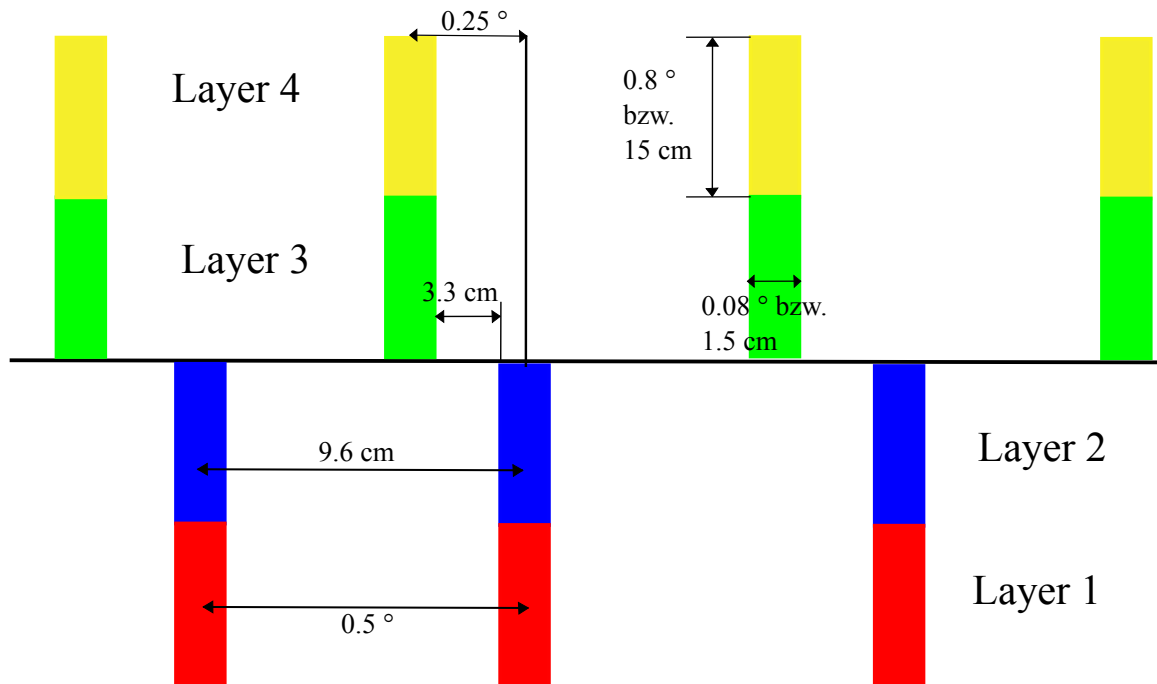


Abbildung 4-1: In der Abbildung ist das Strahlmuster des Ibeo Lux 2010 für eine Scanfrequenz von 12,5Hz und einer Winkelauflösung von 0,25° bei einem Abstand zwischen Sensor und Objekt von 11m schematisch dargestellt.<sup>75</sup>

12,5Hz bzw. 0,08s für einen Messbereich von 100° dreht sich der Spiegel während eines Pulses um  $5,6 \cdot 10^{-6}^\circ$ . Dies führt mit Hilfe der Formel 4-1 bei 11 m Entfernung zu einer beleuchteten Fläche von ca. 1  $\mu\text{m}$ .

Es lässt sich jedoch die theoretisch maximal mögliche Anzahl der Pulse pro Strahl berechnen. Bei einem Messbereich von 100° und einer Auflösung von 0,5° ergibt sich eine Anzahl von 201 Strahlen. Das bedeutet, dass pro Strahl ein maximales Zeitfenster von  $0,08\text{s}/201 \approx 400\mu\text{s}$  zur Verfügung steht, bis der nächste Strahl gesendet wird. Daraus lässt sich schließen, dass pro Strahl mehrere Pulse gesendet werden. Die Anzahl der Pulse wird jedoch deutlich unterhalb der 400 $\mu\text{s}$  liegen, da die Angaben des Herstellers zu den Abständen zwischen den Strahlen sonst nicht mehr korrekt sind.

## Valeo Scala

Bei dem Valeo bzw. Ibeo Scala handelt es sich um einen in Serienproduktionen verwendeten Lidar-Sensor der beispielsweise in einigen Ausstattungsversionen des Audi A6 und A8 verbaut wird. Er basiert auf dem Ibeo Lux 2010, ist allerdings nicht baugleich. Daher wird im Folgenden insbesondere auf die Unterschiede zum Ibeo Lux eingegangen<sup>76</sup>.

Der Ibeo Scala besitzt einen horizontalen Sichtbereich von 145° und einen vertikalen von 3,2°. Genau wie der Ibeo Lux besitzt er vier vertikal übereinander angeordnete Layer und damit ein ähnliches Strahlmuster. Aufgrund seiner Bauweise besitzt er drei Empfänger, wodurch pro Scan drei Layer detektiert werden können. Dadurch, dass Layer 1 und 4 mit halber Abtastfrequenz (also bei jeder

<sup>76</sup> Ibeo-Automotive-AS: Ibeo ScaLa User Manual v1.6 (2018).

---

zweiten Messung) und abwechselnd gemessen werden, lassen sich trotzdem vier Layer detektieren. Daraus ergibt sich eine feste Abtastfrequenz von 25 Hz für die mittleren Layer (2 und 3) und eine Abtastfrequenz von 12,5 Hz für die äußeren Layer (1 und 4). Der Sensor besitzt zudem eine konstante Winkelauflösung von  $0,25^\circ$  im gesamten Messbereich.

### Velodyne VLP-32

Der VLP-32 (Modell VLP-32C) der in Kalifornien ansässigen Firma Velodyne aus dem Jahr 2017 ist ein  $360^\circ$  TOF Lidar-Sensor. Er besitzt 32 Infrarot (IR) Laserdioden jeweils gepaart mit Infrarotdetektoren. Dadurch entsteht eine, im Vergleich zum Ibeo Sensor, hohe Auflösung.<sup>77</sup> Die Infrarotdetektoren und die Infrarot-Laserdioden sind auf einem Motor verbaut, der eine variable Drehgeschwindigkeit von 300 bis 1200 rpm bietet. Dadurch wird die  $360^\circ$  Abdeckung ermöglicht. Die vertikale Auflösung beträgt  $40^\circ$  bzw.  $-15^\circ$  bis  $25^\circ$ . Je nach Umdrehungsgeschwindigkeit variiert entsprechend die Winkelauflösung des Sensors. Bei der niedrigsten Umdrehungsgeschwindigkeit von  $300 \text{ min}^{-1}$  liegt sie bei  $0,1^\circ$  und sinkt mit zunehmender Geschwindigkeit auf  $0,4^\circ$  bei  $1200 \text{ min}^{-1}$ .

Der Velodyne VLP-32 gibt im Gegensatz zu den Ibeo Sensoren, welche die Echo-Pulsweite als Maß für die Reflexivität zurückgeben, einen vom Hersteller als „Calibrated Reflectivity“ bezeichneten Wert zurück. Dieser wird im Folgenden im Zusammenhang mit den Velodyne Sensoren als Intensität bezeichnet. Jedoch ist diese nicht mit der in Kapitel 2 beschriebenen physikalischen Intensität zu verwechseln.

Die Intensität (Velodyne) wird als eine Zahl zwischen 0 und 255 skaliert. Ist der Wert im Bereich zwischen 0 und 100, handelt es sich um einen diffusen Reflektor. Dabei entspricht der Wert laut Hersteller der geschätzten prozentualen Reflexivität des getroffenen Objekts. Diese lässt sich jedoch insbesondere durch die Ausrichtung der Fläche zum Sensor beeinflussen. Befindet sich der Wert im Bereich von 101 bis 255, entspricht das Objekt einem schlechten und oder stark verschmutzten Retroreflektor bzw. einem idealen Retroreflektor, bei einem Wert im oberen Bereich des genannten Intervalls.

Der Sensor bietet verschiedene Empfangsmodi. So lässt sich beispielsweise zwischen der stärksten und der letzten Reflexion wählen. Im Dual-Mode werden beide zurückgegeben. Es besteht eine Mehrzielfähigkeit von zwei Zielen pro Strahl.

Die 32 Laser-Dioden sind nicht wie zu erwarten alle vertikal übereinander angeordnet, sondern in insgesamt vier horizontalen Linien nebeneinander verbaut. Dies führt dazu, dass jeder Strahl einen gewissen Offset, eine Verschiebung zum Ursprung, besitzt. Das sich hieraus ergebende Strahlmuster ist in Tabelle 4-1 als Ausschnitt für zwölf zentrale Layer dargestellt. Der Offset liegt hier zwischen  $4,2^\circ$  und  $-4,2^\circ$ . Jedes X in der Tabelle steht für eine Diode an den entsprechenden Winkeln.

Die zeitliche Strahlaufweitung lässt sich näherungsweise über die Schusssequenzen des Sensors berechnen. Der Sensor sendet in einem Zeitfenster von  $55,296 \mu\text{s}$  alle 32 Laser aus und lädt sie wieder auf. In  $2,304 \mu\text{s}$  wird ein Paar aus zwei Dioden ausgesendet, anschließend folgt das nächste Paar, bis alle 32 Laserdioden gezündet wurden. In den verbleibenden  $18,432 \mu\text{s}$  werden alle Di-

---

<sup>77</sup> Velodyne: Velodyne VLP-32 User Manual (2017).

oden aufgeladen, anschließend wiederholt sich der Vorgang. Wird eine Umdrehungsgeschwindigkeit von  $600 \text{ min}^{-1}$  angenommen, ergibt sich mit Hilfe des Dreisatzes ein Winkel von  $8.294 \cdot 10^{-6}^\circ$  in  $2,304 \mu\text{s}$ .

Tabelle 4-1: In der Tabelle ist ein Ausschnitt der Anordnung der 32 Layer mit den vier Offset Winkeln dargestellt.<sup>78</sup>

Elevation in [°]	Azimut Offset			
	+4,2°	+1,4°	-1,4°	-4,2°
1,667	X			
1,333		X		
1,000			X	
0,667				X
0,333	X			
0,000		X		
-0,333			X	
-0,667				X
-1,000	X			
-1,333		X		
-1,667			X	
-2,000				X

Bei 11 m Entfernung zum Sensor führt dies zu einer zeitlichen Strahlaufweitung von 1,6 mm. Des Weiteren lässt sich für den genannten Fall von  $600 \text{ min}^{-1}$  und 11 m auch der Abstand zwischen zwei Strahlen berechnen. Zwischen Ende des Sendens und erneutem Zünden derselben Diode vergehen ca.  $55,296 \mu\text{s} - 2,304 \mu\text{s} = 53 \mu\text{s}$ . Dies führt zu einem Winkel von  $0,1908^\circ$  bzw. einem Abstand von 3,6 cm zwischen zwei Strahlmittelpunkten.

Die Strahlaufweitung des Sensors lässt sich über die Formel 4-1 berechnen. Sie beträgt laut Hersteller 3,0 mrad in horizontaler Richtung (Azimut) und 1,5 mrad in vertikaler Richtung (Elevation). Daraus ergibt sich bei einer Entfernung von 11 m eine Strahlgröße von 3,3 x 1,65 cm (Breite x Höhe). Der sichtbare Abstand beträgt somit  $0,1908^\circ - 0,1718^\circ = 0,019^\circ$ , was ca. 4 mm bei einer Entfernung von 11 m vom Sensor und mit Berücksichtigung der zeitlichen Strahlaufweitung entspricht. Die berechneten Größen sind in Abbildung 4-2 (b) schematisch dargestellt. Die angegebenen Dimensionen entsprechen den zuvor berechneten für eine Distanz von 11 m.

Die Lichtquellen bestehen nicht aus einer einzelnen Diode, sondern aus einem sogenannten Stack, aus drei pn-junction Dioden, die horizontal übereinander gestapelt sind. Dies führt dazu, dass der auftretende Strahl nicht gleichmäßig ausgeleuchtet wird, sondern aus stärker und schwächer beleuchteten Abschnitten besteht. Der schematische Aufbau der gestapelten Dioden ist in Abbildung 4-2 (a) dargestellt. Das sich theoretisch daraus ergebende Abbild des Strahls auf einer ebenen Fläche ist in Abbildung 4-2 (b) dargestellt.

<sup>78</sup> Basierend auf Velodyne: Velodyne VLP-32 User Manual (2017), S. 69, Tabelle 9.6

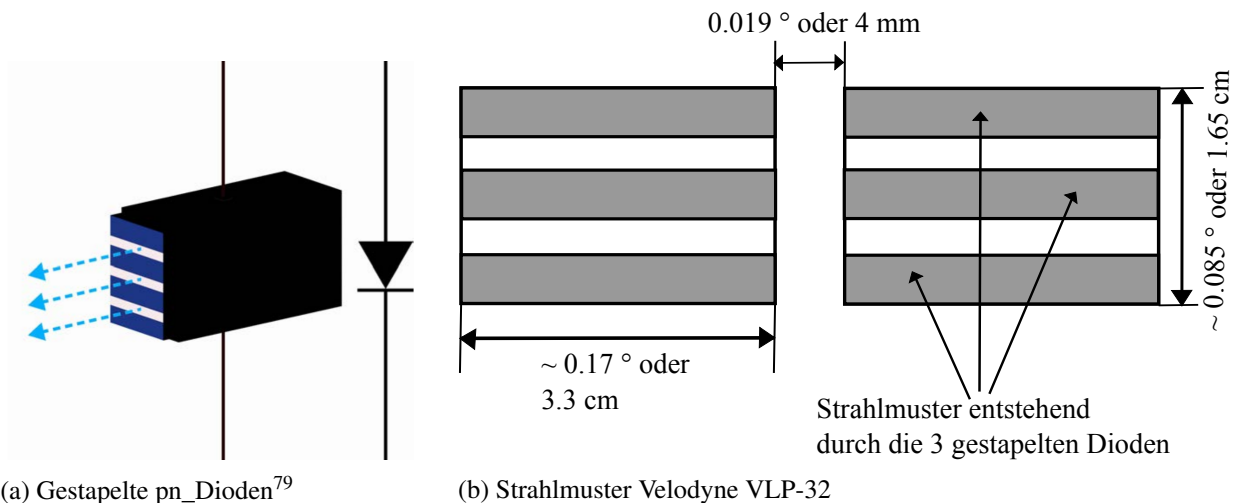


Abbildung 4-2: In der Abbildung (a) ist eine gestapelte pn-Leuchtdiode (engl. series of stacked p-n junction Diodes) schematisch dargestellt. In Abbildung (b) ist ein Ausschnitt des Strahlmusters des VLP-32 mit Größenangaben für 11 m Entfernung zwischen Sensor und einer ebenen Fläche dargestellt.

## Velodyne VLP-16

Der Velodyne VLP-16 ist genauso wie der VLP-32 ein  $360^\circ$  TOF Lidar-Sensor im sogenannten Ultra-Puck Format. Im Gegensatz zu diesem besitzt der VLP-16 nur 16 Layer und damit eine geringere horizontale Auflösung. Da der Sensor größtenteils baugleich zum VLP-32 ist, werden im Folgenden nur kurz die Unterschiede beschrieben, die sich aus der reduzierten Anzahl der Layer ergeben.

In dem bereits genannten Zeitfenster von  $55,296\mu\text{s}$  werden auch beim VLP-16 alle Laserdioden gezündet, im Gegensatz zum VLP-32 aber einzeln und nicht in Paaren. Das vertikale Sichtfeld beträgt nur  $30^\circ$  ( $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$ ) bei einer Unterteilung in  $2^\circ$  Schritten pro Layer. Die 16 Dioden sind in einer vertikalen Linie übereinander angeordnet, wodurch im Gegensatz zum VLP-32 kein Winkeloffset entsteht.

### 4.1.2 Verwendete Messgeräte

#### Infrarot-Kamera

Um die Infrarotstrahlen im Wellenlängenbereich von 890 bis 915 nm der Lidar-Sensoren für die Versuche sichtbar zu machen, wird eine Spiegelreflexkamera umgebaut. Dabei handelt es sich um eine Canon EOS 550D mit einem 18 MegaPixel APS-C Sensor und einem 18-55 mm Objektiv.

Die Kamera wird soweit zerlegt, dass sich der verbaute Sensor herausnehmen lässt. Anschließend wird der vor dem Sensor befindliche Tiefpass-Filter und der IR-Cut Filter entfernt. Beide Filter entfernen Infrarot-Anteile des Lichts. Nach dem Entfernen dieser Filter wird der Sensor wieder eingesetzt und die Kamera zusammengebaut. Sie ist ohne weitere Modifikationen voll funktionsfähig, mit einer höheren Empfindlichkeit gegenüber Infrarotlicht.

<sup>79</sup> Basierend auf Velodyne: Velodyne VLP-32 User Manual (2017), S. 121, Abbildung F-1



---

Die Empfindlichkeit des Sensors nimmt im Allgemeinen jedoch ab ca. 850 bis 900 nm Wellenlänge ab. Daher sind die Möglichkeiten zur Messung von Infrarotlicht trotz Entfernen der beiden Filter beschränkt.

Um einen höheren Einfall von Licht zu ermöglichen, wird neben dem 18-55 mm Objektiv mit einer Blende von  $f/3.5$  für Versuch 1 noch ein lichtstärkeres 35 mm Objektiv mit einer Blende von  $f/2.0$  verwendet.

### **PeacTech 2802**

Bei dem PeacTech 2802 handelt es sich um ein Laser-Entfernungsmessgerät das zur genauen Abmessung des Versuchsaufbaus verwendet wird. Es besitzt eine Genauigkeit von  $\pm 1,5$  mm und einen vom Hersteller spezifizierten Messbereich von 0,05 m bis 80 m.

### **Maßband, Lineal und Wasserwaage**

Zur Vermessung der Strahlmuster der verschiedenen Sensoren wird ein Lineal bzw. ein Maßband mit jeweils einer Auflösung von 1 mm verwendet. Die Messgenauigkeit liegt bei ca. 2-3 mm. Dies hängt z.B. mit der nicht exakt horizontalen Ausrichtung und dem Ablesefehler zusammen. Da das Ablesen nur durch die Fotos der Digitalkamera möglich ist und die Qualität der Bilder aufgrund des Rauschens nicht gut ist, lässt sich ein auf 1 mm genaues Ablesen nicht immer sicherstellen.

Zum Ausrichten der Stellwand und des Prüfstandes wird eine handelsübliche Wasserwaage verwendet.

#### **4.1.3 Sonstige Hilfsmittel**

##### **Radar-Prüfstand**

Um eine möglichst genaue Positionierung der Sensoren zu gewährleisten wird ein am Fachgebiet entwickelter sogenannter Radar-Prüfstand eingesetzt. Da der Prüfstand für Radar-Sensoren entwickelt wurde, wird er als Radar-Prüfstand bezeichnet. Er bietet die Möglichkeit einer flexiblen Höhenverstellung dank einer Linearführung mit der maximal einstellbaren Höhe von einem Meter. Da die maximale Höhe nicht ausreichend ist, wird der Prüfstand zusätzlich auf eine stabile Konstruktion aus Tisch und Wasserkästen gestellt. Die verbaute Libellenwasserwaage bietet eine Genauigkeit von  $0,1 \text{ mm}^{-1}$  und stellt so eine exakte waagrechte Positionierung der Sensoren sicher. Die Positionierung wird durch die verstellbaren Stellfüße des Prüfstands ermöglicht, so lassen sich Unebenheiten von bis zu 4 cm ausgleichen. Mit Hilfe des verbauten Goniometers (Messinstrument zur Bestimmung von Winkeln) ist es möglich den Azimut und den Elevationswinkel nach Bedarf einzustellen.

Mit Hilfe eines Adapters lassen sich Ibeo Lux 2010 (Generation Lux 4) Sensoren montieren. Da für die anderen Sensoren kein Adapter zur Verfügung steht, werden diese auf den Ibeo Sensor gestellt, anhand der rückseitigen Kante des Sensorgehäuses ausgerichtet und anschließend festgeklebt. Eine

---

Bedienungsanleitung sowie eine ausführliche Beschreibung des Prüfstandes ist der Masterarbeit von Jochen Müller zu entnehmen.<sup>80</sup>

## **Stellwand**

Als Auftrefffläche der Strahlen für die Messungen dient ein gewöhnlicher grauer Bastelkarton der Größe DIN A0. Dies ermöglicht eine leichte Reproduzierbarkeit beim Wiederholen der Versuche. Des Weiteren hat graue Pappe durchschnittliche Reflexionseigenschaften. Diese entsprechen in etwa den Reflexionseigenschaften eines stark verschmutzten Hecks eines Fahrzeugs, das der Sensor wiederum erkennen muss (vgl. Zirulnik<sup>81</sup>).

Befestigt ist der Karton auf einer für den Versuch gebauten Staffelei aus Alu-Profilen. Der Karton ist nicht exakt eben, sondern leicht gebogen. Er entspricht nicht dem Kreisumfang für die jeweilige Messdistanz von 8 m und 11 m. Die Tiefenungenauigkeit entspricht daher einigen wenigen Zentimetern. Mit Hilfe der Formel 4-1 lässt sich allerdings zeigen, dass der Messfehler gering ist. Bei einer Ungenauigkeit von 5 cm verändert sich die Strahldivergenz für den Extremfall (vertikal,  $0,8^\circ$ ) bei einer Entfernung von 11 m beim Ibeo Lux 2010 um ca. 0,7 mm. Da die Messungenauigkeit im Bereich von 1 mm bis 2 mm liegt, spielt dies keine große Rolle. Auch liegt die Messungenauigkeit des Ibeo Lux 2010 bei 4,4 cm.

## **Räumlichkeit**

Als Räumlichkeit dient ein ca. 14 m langer und 6 m breiter Vorlesungsraum an der Universität. Der Raum lässt sich abdunkeln und ist damit gut geeignet, um Fotos der Infrarotstrahlen der Lidar-Sensoren aufzunehmen. Neben der Abschirmung von Tageslicht sind auch die Notbeleuchtungen abgedunkelt, um für eine möglichst geringe Störung durch andere Lichtquellen zu sorgen. Der Nachteil des Raums ist jedoch der relativ hohe Steigungswinkel für die Sitzplätze. Dies führt dazu, dass der Sensor eine relativ hohe Position benötigt, um das am Ende des Raums befindliche Ziel vollständig zu treffen.

## **4.2 Versuchsaufbau**

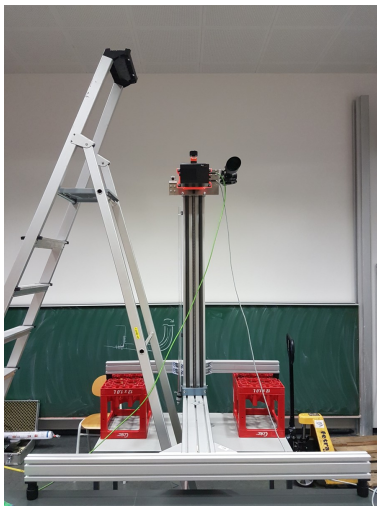
Im Folgenden ist der Versuchsaufbau der sechs Versuche beschrieben. Die Versuche 1 bis 6 wurden an zwei Messtagen durchgeführt, ohne jedoch den Versuchsaufbau zu verändern. Daher ist dieser für jeden Sensor identisch und wird im Folgenden nur einmal beschrieben. Um die Messung von Versuch 1 mit einem zweiten Kamera-Objektiv durchführen zu können, wird dieser zusätzlich an einem dritten Tag, unter den gleichen Bedingungen wie am ersten Tag, wiederholt.

Der Lidar-Sensor wird auf dem Radar-Prüfstand befestigt, wie in Abbildung 4-3 dargestellt. Anschließend wird mit Hilfe der Wasserwaage und dem Laser-Entfernungsmesser überprüft ob sich der Sensor

---

<sup>80</sup> Müller, J.: Konstruktion und Entwicklung eines Radar-Prüfstandes (2017).

<sup>81</sup> Zirulnik, M.: Untersuchung der Charakteristik der Mehrzielfähigkeit sowie des Rauschverhaltens eines Automotive LIDAR Sensors (2017), S. 29-30.



(a) Frontaler Blick auf Prüfstand und Sensor



(b) Seitlicher Blick auf Prüfstand und Sensoren



(c) Blick auf Ziel-Objekt und Kamera bei 8 m Entfernung

Abbildung 4-3: Versuchsaufbau aus verschiedenen Perspektiven

waagrecht und mittig zwischen den seitlichen Wänden des Raums befindet. Die Stellwand, welche als Ziel dient, wird nun so positioniert, dass sie sich im gewünschten Abstand zum Sensor befindet und entsprechend gerade zum Sensor ausgerichtet ist. Die Kamera wird zwischen Radarprüfstand und der Stellwand platziert. Die Stellwand ist mit der auf einem Stativ befindlichen Kamera bei einem Abstand von 8 m in Abbildung 4-3 (c) zu sehen. Der gesamte Versuchsaufbau, gültig für alle sechs Versuche, ist als Skizze in Abbildung 4-4 dargestellt.

Für Versuch 5 und 6 wird zudem eine Glasscheibe bzw. ein zweiter Reflektor auf halber Strecke zwischen Sensor und Stellwand angebracht.

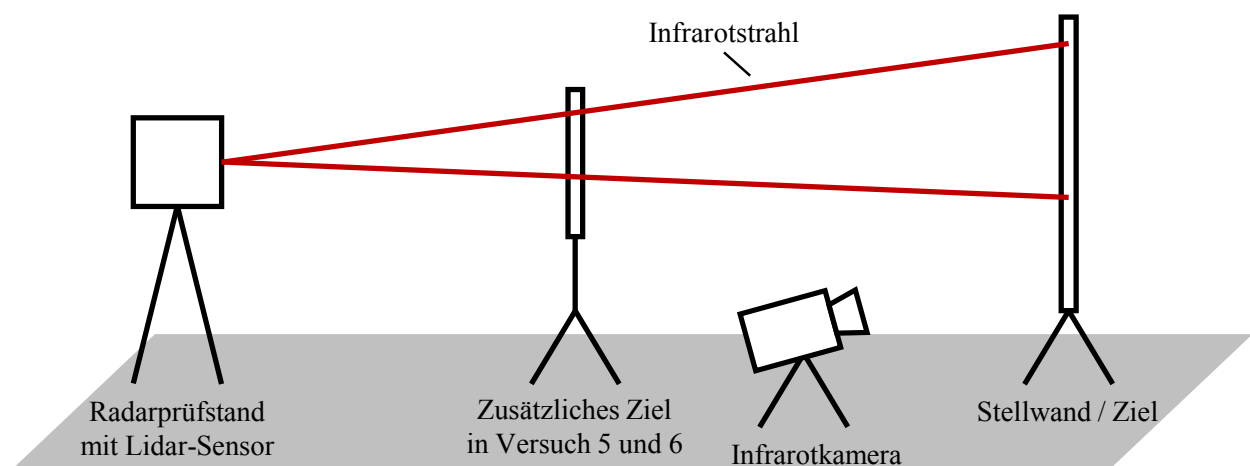


Abbildung 4-4: In der Abbildung ist der Versuchsaufbau für die Versuche 1 bis 6 skizziert.

Der Velodyne VLP-32 und der VLP-16 werden im Dual-Mode bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von  $600 \text{ min}^{-1}$  betrieben. Die drei eingesetzten Ibeo Lux 2010 Sensoren sind auf eine Abtastfrequenz von  $12,5 \text{ Hz}$  mit einer konstanten Winkelauflösung von  $0,25^\circ$  konfiguriert. Der Valeo Scala besitzt,

---

wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, eine Abtastfrequenz von 25 Hz (zentrale Layer) bzw. 12,5 Hz (äußere Layer) und einer für jeden einzelnen Layer geltenden Winkelauflösung von 0,25°.

Die exakte Distanz zwischen Sensor und Ziel wird von der Hinterkante des Ibeo Lux 2010 gemessen. Da die eingesetzten Sensoren jeweils einen unterschiedlichen Punkt als Ursprung für die Messung verwenden, variiert die Distanz zwischen Sensor und Ziel leicht. Für den Ibeo Lux 2010 ergibt sich eine Distanz von 11,063 m und 7,906 m. Für die beiden Velodyne Sensoren ergeben sich jeweils Distanzen von 11,055 m und 7,898 m. Für die Distanz des Valeo Scala wird die Hinterseite des Sensors angenommen, welche 11,107 m und 7,950 m beträgt.

Die benötigte Höhe des Sensors wird durch Testaufnahmen mit der Kamera bestimmt, um vertikal den größten möglichen Teil des Strahlmusters auf der Stellwand darzustellen.

Der jeweils eingesetzte Sensor ist mit einem Messrechner verbunden. Auf diesem befindet sich die vom Hersteller bereitgestellte Software zum Aufnehmen der Punktwolke, die für die Auswertung der Messergebnisse genutzt wird.

### **4.3 Versuch 1: Vermessung des Strahlmusters**

#### **4.3.1 Ziel**

In diesem Versuch wird die Form und Abmessung der unterschiedlichen Strahlmuster der Sensoren untersucht. Dies ist notwendig, um anschließend einen Vergleich mit den Angaben der Hersteller durchzuführen und das zukünftige Modell möglichst genau zu parametrisieren.

#### **4.3.2 Durchführung**

##### **Details**

- Distanz zwischen Sensor und Stellwand: 8 m und 11 m
- Messinstrument: PeakTech 2802, EOS 550D, Maßband und Lineal
- Sensoren: Ibeo Lux 2010 (2x Generation Lux 4 & 1x Generation Lux 1), Velodyne VLP-32, Velodyne VLP-16, Valeo Scala (nur bei 8 m)
- Ziel: Stellwand
- Umgebungsbedingungen: Vorlesungsraum, abgedunkelt
- Wiederholung: 2x (1x mit 18-55 mm Objektiv und 1x mit 35 mm Objektiv)

##### **Vorgehen**

Zu Beginn des Versuchs beträgt die Raumtemperatur ca. 29°C und die Luftfeuchtigkeit 42 %.

---

Der Raum ist für jede Aufnahme mit der Kamera abzudunkeln. Der Sensor ist eingeschaltet und ist nach den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Einstellungen konfiguriert. Nach der Positionierung wird das Strahlmuster des Sensors mehrfach mit unterschiedlichen Belichtungszeiten fotografiert. Dabei erfolgt eine horizontale sowie eine vertikale Vermessung des Strahlmusters mit dem Maßband.

Um eine bessere Sichtbarkeit des Infrarotlichts zu gewährleisten, wird eine Belichtungszeit von 8 s für eine Distanz von 11 m zwischen Sensor und Stellwand gewählt. Als Objektiv wird das 18-55 mm Canon Objektiv mit einer Blende von  $f3,5$  eingesetzt. Bei der Distanz von 8 m wird das gleiche Vorgehen wiederholt. An einem dritten Versuchstag wird der Versuch bei 8 m erneut durchgeführt. Hier wird das lichtstärkere Canon 35 mm Objektiv mit einer Blende von  $f2$  verwendet. Als Belichtungszeit wird  $1/13$  s und 8 mm gewählt. Die Belichtungszeit von  $1/13$  s ist so gewählt, dass sie nur einen Scanvorgang der Sensoren ablichtet.

### 4.3.3 Ergebnisse

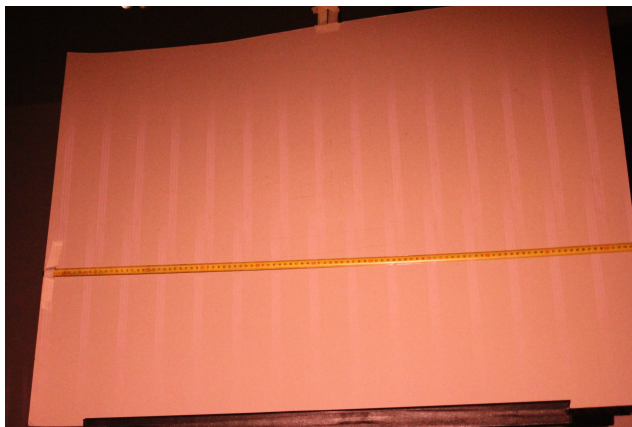
Versuch 1 dient insbesondere der Vermessung der Strahlaufweitung und des Strahlmusters der verschiedenen zur Verfügung stehenden Lidar-Sensoren. Um zu überprüfen, welchen Einfluss die Belichtungszeit auf das Strahlmuster hat, werden Bilder mit einer Belichtung von 8 s und von  $1/13$  s analysiert. Da der Ibeo Lux 2010 mit einer Abtastfrequenz von 12,5 Hz arbeitet und der Velodyne bei  $600 \text{ min}^{-1}$  mit einer Abtastfrequenz von 10 Hz, ist sichergestellt, dass nur ein Beleuchtungsvorgang von der Kamera abgelichtet wird. Der Valeo Scala arbeitet mit einer Frequenz von 25 Hz bei den inneren Layern und mit 12,5 Hz bei den äußeren Layern. Somit sind die äußeren Layer bei der Aufnahme einmal beleuchtet. Eine Erhöhung der Belichtungsdauer auf 8 s führt zu einer deutlichen Aufwertung der Bildqualität im Vergleich zu  $1/13$  s.

Neben der im Folgenden beschriebenen Vermessung des Strahlmusters wird in diesem Versuch auch der Durchschnittswert für die Messgrößen der Sensoren auf der Stellwand bestimmt. Für die Ibeo Lux 2010 Sensoren ergibt sich eine durchschnittliche Echopulsweite auf der Stellwand von ca. 1,98 m bis 2 m für 11 bzw. 8 m Abstand. Für die Velodyne Sensoren ergibt sich eine Intensität von ca. 109 bis 110 für 11 m bzw. 8 m Abstand. Nachfolgend werden die Ergebnisse zur Vermessung des Strahlmusters der sechs Sensoren erläutert.

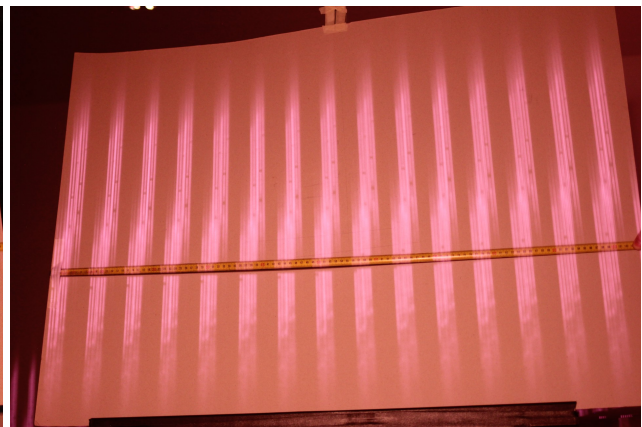
#### Ibeo Lux 2010

Der Ibeo Lux 2010 liegt bei FZD zur Zeit der Versuche dreimal vor. Zwei der Sensoren stammen aus der Baureihe Lux4 aus dem Jahr 2012, einer aus der Baureihe Lux1 aus dem Baujahr 2008. In der Benutzeranleitung wird von keinem Unterschied zwischen den Sensoren gesprochen. In Abbildung 4-5 (a), (b) und in (c), (d) lassen sich jedoch Unterschiede beim Strahlmuster bei einer Belichtungszeit von  $1/13$  s zu einer von 8 s feststellen. Wie in Bild 4-5 (a) und (b) zu sehen, sieht der Strahl bei der Modellreihe Lux 4 bei 8 s breiter aus, als bei  $1/13$  s. Bei der Baureihe Lux 1 sieht der Strahl in beiden Fällen gleich aus, nur stärker beleuchtet. Die Verbreiterung ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Spiegel im Sensor bei den nachfolgenden Umdrehungen nicht den exakt gleichen Bereich

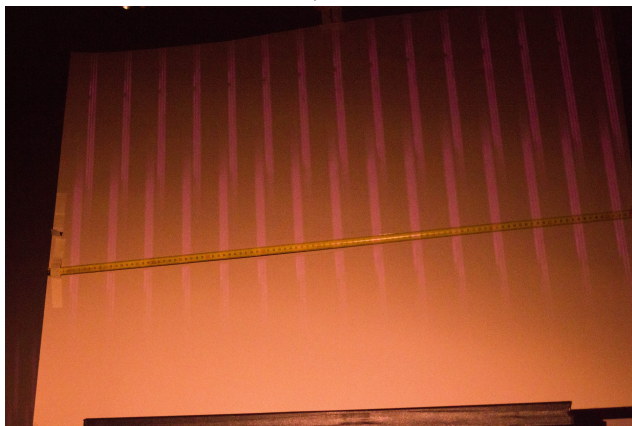
trifft wie bei der Umdrehung zuvor. Dies führt bei der längeren Belichtungszeit zu dem ineinanderlaufenden und verbreiterten Muster. Um sicherzugehen, dass es sich hierbei nicht um einen einzelnen Fehler handelt, wird der Versuch bei einem zweiten Sensor der Baureihe Lux 4 wiederholt und führt zum gleichen Ergebnis. Diese Eigenschaft ist in den Datenblättern von Ibeo nicht dokumentiert. Des Weiteren ist in Abbildung 4-5 (a) und (d) das Strahlmuster der Ibeo Lux 2010-Familie dargestellt. Diese sind bei beiden Generationen identisch. Zum einen ist das in Abschnitt 4.1.1 beschriebene reißverschlussförmige Gesamtmuster aus allen vier Layern sichtbar, zum anderen ist das Muster eines einzelnen Strahls erkennbar. Jeder einzelne Strahl besteht aus drei vertikalen Lichtstrahlen, die von den drei gestapelten Infrarot LED's des Sensors stammen. Es ist ebenfalls in der Abbildung zu erkennen, dass der Strahl in gewisser Näherung einer Raute entspricht, da er oben und unten gegenläufig abgeschnitten ist. Da der Sensor für die beiden oberen und die beiden unteren Layer jeweils nur eine Diode verwendet fallen zwei Layer ineinander und lassen sich optisch nicht voneinander unterscheiden.



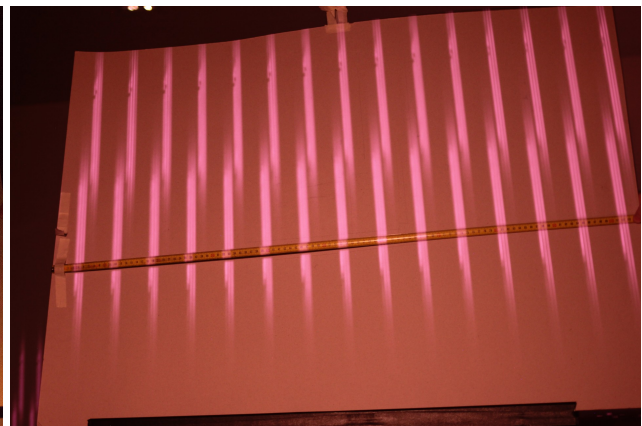
(a) Lux4 - Belichtungszeit: 1/13 s



(b) Lux4 - Belichtungszeit : 8 s



(c) Lux1 - Belichtungszeit: 1/13 s



(d) Lux1 - Belichtungszeit 8 s

Abbildung 4-5: Strahlmuster des Ibeo Lux 2010 bei einer Entfernung von 11 m. Abgebildet sind zwei Modellreihen bei jeweils unterschiedlichen Belichtungszeiten.

Bei einer Distanz von 8 m ergibt sich, wie in Abschnitt 4.1.1 für 11 m beschrieben, mit Formel 4-1 eine Strahlaufweitung von näherungsweise 1,1 cm x 11 cm (Breite zu Höhe). Die berechnete Breite

---

und die mit Hilfe des Maßbandes festgestellte Breite stimmen nicht überein. Es ergibt sich anhand der Bilder eine Breite von ca. 1,6 cm bei allen Sensoren und damit eine Differenz von ca. 5 mm. Dies lässt sich auf die zeitliche Strahlaufweitung zurückführen. Jedoch trifft dies nur begrenzt zu, da sonst die drei Strahlen der Dioden stärker ineinander verwischen würden. Zum anderen scheint auf den Bildern (Abb.4-5) der Strahl zum Rand etwas auszufransen, was vermutlich an der Optik liegt, die für eine Vergrößerung des Strahls sorgt.

Da immer zwei Layer direkt übereinander liegen, lässt sich mit Hilfe des Maßbandes nur die Höhe von zwei Strahlen bestimmen. Dies führt zu einer errechneten Höhe von ca. 22 cm, allerdings ergibt sich beim Ablesen eine Höhe von etwa 40 cm bei allen drei Sensoren. Wie bereits erwähnt besitzen die Strahlen eine rautenähnliche Form und zeigen damit ein starkes Ausfransen an den jeweiligen Enden. Daraus ergibt sich bei 8 m schon eine Differenz zwischen der tatsächlichen und der theoretischen Höhe von ca. 9 cm für einen Layer. Zusätzlich unterscheidet sich das tatsächliche Strahlmuster hinsichtlich der Tatsache, dass die mittleren Layer jeweils in den Winkelbereich des vertikal benachbarten Layers reichen.

Bei den Abständen zwischen den Strahlen eines Layers ergibt sich für die Sensoreinstellungen nach Kapitel 4.1.1 berechnet eine Distanz von 5,8 cm. Für die Messung ergibt sich ein niedrigerer Wert von ca. 5,3 cm. Wird berücksichtigt, dass die Strahlen jeweils, wie bereits beschrieben, in der Breite ca. 5 mm größer sind erscheint dieser Wert nachvollziehbar. Auch der Abstand an der Schnittstelle zwischen den oberen und unteren Layern scheint das korrekte Verhältnis zu besitzen. Nur bei einem der Lux 4 Sensoren laufen die beiden oberen und unteren Layer an der Schnittstelle ineinander ( siehe Abb. A-2 im Anhang).

Bei einer Distanz von 11 m ergibt sich eine Strahlaufweitung von näherungsweise 1,5 cm x 15 cm (Breite zu Höhe). Beim Vergleich zwischen berechneten und tatsächlichen Größen ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei 8 m. Die Größen sind ungefähr um das Verhältnis der Distanzverschiebung größer. Die Höhe zweier Strahlen steigt beispielsweise linear von ca. 40 cm auf 60 cm und damit um weitere 10 cm pro Layer. Für größere Entfernungen führt dies zu deutlichen Abweichungen von den Herstellerangaben. Im Anhang A.3 sind die Infrarotbilder für den Ibeo Lux 2010 Lux 1 (Abbildung A-3) und Lux4 (Abbildung A-4) bei 11 m dargestellt.

### **Velodyne VLP-32 und VLP 16**

Da sich die Strahlmuster von VLP-32 und VLP-16 nur in der Anzahl der Layer unterscheiden, wird im Folgenden das Muster des VLP-32 betrachtet. Es zeigt sich, dass die Bilder (Abb. 4-6) eine schlechte Qualität besitzen. Da die Velodyne Sensoren, im Vergleich zu den Ibeo Sensoren, mit einer geringeren Intensität arbeiten, ist eine höhere Empfindlichkeit des Kamerasensors notwendig, die in diesem Fall jedoch zu stärkerem Rauschen führt. Trotzdem lassen sich anhand der Bilder einige Erkenntnisse gewinnen. Beispielsweise zeigen Abbildung 4-6 (a) und (c) auf, dass die einzelnen Strahlen identifizierbar sind.

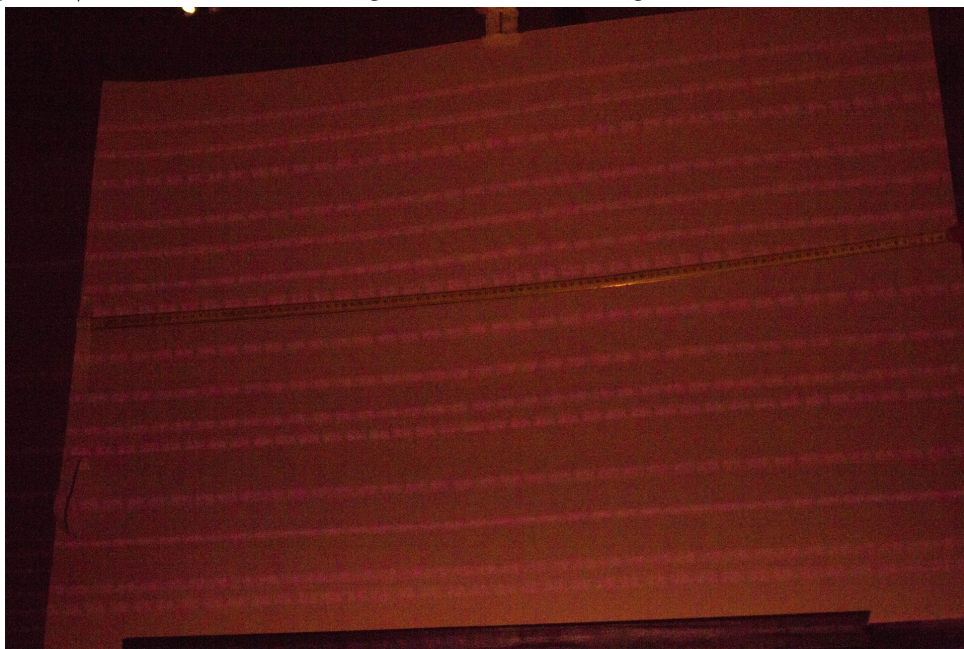




(a) Belichtungszeit 1/13 s - vertikale Vermessung



(b) Belichtungszeit 8 s



(c) Belichtungszeit 1/13 s- horizontale Vermessung

Abbildung 4-6: Strahlmuster des Velodyne VLP-32 bei einer Entfernung von 8 m. Abgebildet sind verschiedene Belichtungszeiten.

Die Strahlaufweitung berechnet sich nach Abschnitt 4.1.1 für 8 m zu 2,4 cm x 1,2 cm (Breite zu Höhe). Die abgelesenen Werte, soweit dies möglich ist, sind fast identisch. Sie liegen bei ca. 2,5 cm bis 3 cm in der Breite und ca. 1,5 cm in der Höhe. Allerdings scheint der Strahl etwas breiter zu sein und zeigt auch ein leichtes Ausfransen in beide Richtungen. Das gilt auch in diesem Fall und ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die zeitliche Strahlaufweitung und die Optik zurückzuführen. Abbildung 4-6 (b) zeigt eine Aufnahme mit einer Belichtungsdauer von 8 s. Es ist zu erkennen, dass die einzelnen Strahlen ineinander übergehen und sich ein einziger Strahl bildet. Das liegt vermutlich am Regler des Motors, der laut Hersteller eine Ungenauigkeit von  $\pm 3 \text{ min}^{-1}$  besitzt. Dies führt dazu, dass der Strahl bei der jeweils nächsten Umdrehung mit großer Wahrscheinlichkeit nicht exakt dieselbe Stelle beleuchtet wie bei der Umdrehung zuvor. Das durch den 3er-Diodenstack entstehende Strahlmuster ähnlich zum Ibeo ist auf den Bildern nicht zu erkennen, obwohl dieses laut Hersteller verwendet wird.



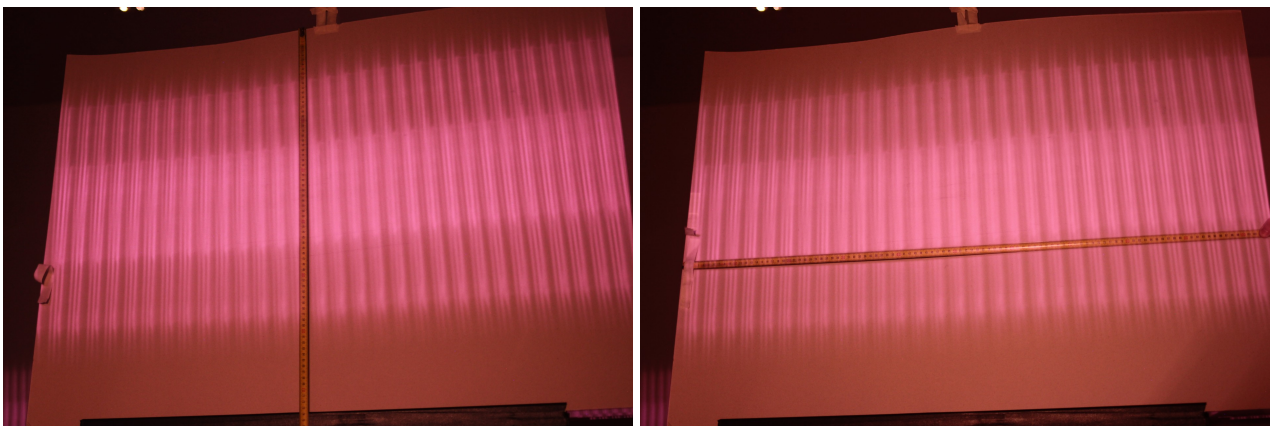
Vermutlich sorgt die Optik dafür, dass die drei einzelnen Strahlen bei dieser Distanz bereits ineinander überlaufen.

Die Ergebnisse bei einer Distanz von 11 m sind den Erwartungen entsprechend um die erhöhte Entfernung skaliert und werden nicht weiter beschrieben. Sie sind im Anhang A.3 in Abbildung A-5 für den Velodyne VLP-16 und in Abbildung A-6 für den Velodyne VLP-32 dargestellt.

### Valeo Scala

Die Unterschiede zwischen dem Valeo Scala und dem Ibeo Lux 2010 sind bereits in Abschnitt 4.1.1 beschrieben und in Abbildung 4-7 dargestellt. Der Valeo Scala arbeitet mit einer höheren Winkelauflösung als der Ibeo Lux 2010. Dies führt zu dichter aneinander liegenden Strahlen. Die erhöhte Abtastfrequenz des Sensors bzgl. der inneren Layer ist in Abbildung 4-7 aufgezeigt. Da die Aufnahmen in (b) mit einer Belichtungszeit von  $1/13\text{ s}$  erstellt ist, führt die Abtastfrequenz von  $25\text{ Hz}$  zu einer erhöhten Beleuchtungsstärke in diesem Bereich. Die Strahlaufweitung des Sensors scheint größer zu sein als beim Ibeo Lux 2010, da der Strahl breiter und auch höher ist.

Eine genauere Analyse des Strahlmusters ist nicht möglich, da für diesen Sensor genauere Angaben des Herstellers hierzu fehlen.



(a) Belichtungszeit 8 s

(b) Belichtungszeit  $1/13\text{ s}$

Abbildung 4-7: Strahlmuster des Valeo Scala. Abgebildet sind zwei Belichtungszeiten.

## 4.4 Versuch 2: Korrelation der Echopulsweite und Intensität bzgl. des Objekttyps

### 4.4.1 Ziel

In Versuch 2 wird der Einfluss von Materialien mit verschiedenen Reflexionseigenschaften auf die Echopulsweite der beiden Ibeo Sensoren und auf die Intensität der beiden Velodyne Sensoren untersucht werden. Dies ist von Interesse, da im Sensormodell beide Messgrößen möglichst genau zu implementieren sind.

#### 4.4.2 Durchführung

##### Details

- Distanz zwischen Sensor und Stellwand: 8 m und 11 m
- Messinstrument: PeakTech 2802, EOS 550D
- Sensoren: Ibeo Lux 2010 (Generation Lux 4 & Lux 1), Velodyne VLP-32, Velodyne VLP-16,
- Ziel: Stellwand bzw. Materialien aus schwarzem und weißem Karton und ein mit Reflektorklebeband beklebter Karton.
- Wiederholungen: 10
- Umgebungsbedingungen: Vorlesungsraum, abgedunkelt

##### Vorgehen

Der Sensor und die Stellwand sind, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben positioniert und konfiguriert.

Auf die Stellwand wird jeweils eines der drei verschiedenen Materialtypen angebracht. Die Größe der Objekte ist so gewählt, dass sie mindestens einen Infrarotstrahl des jeweiligen Sensors komplett ausfüllen. Die verwendeten Materialien und deren Größen sind der Tabelle 4-2 zu entnehmen. Bei der Reflektor Pappe handelt es sich um Pappe, die mit einem retroreflektierenden Klebeband überklebt ist. Für die zwei untersuchten Distanzen von 8 m und 11 m werden jeweils die gleichen Objekte verwendet.

Tabelle 4-2: Dimensionen der Reflektormaterialien für die jeweiligen Sensoren

Sensor	Materialtyp	Länge in [cm]	Breite in [cm]
Ibeo	Reflektor Pappe	28	2,8
Ibeo	Weißer Pappe	28	2,8
Ibeo	Schwarze Pappe	28	2,8
Velodyne	Reflektor Pappe	6	3
Velodyne	Weißer Pappe	6	3
Velodyne	Schwarze Pappe	6	3

Die korrekte Positionierung des Objekts wird durch Testaufnahmen mit der Kamera sichergestellt. Dabei wird die Position durch das Infrarotbild der Kamera überprüft. Passt die Position nicht, wird sie geändert und ein neues Foto erstellt.

Anschließend wird der Raum abgedunkelt und die Messung durch die vom jeweiligen Sensorhersteller bereitgestellte Software gestartet. Diese wird insgesamt zehnmal durchgeführt, indem die Aufnahme gestoppt und wieder neu gestartet wird. Eine Aufnahme dauert ca. 5 s und wird zur späteren Auswertung abgespeichert.

#### 4.4.3 Ergebnisse

In Versuch 2 wird mit Hilfe verschiedener Reflexionseigenschaften von Materialien die Korrelation zwischen Echopulsweite (Ibeo) und Intensität (Velodyne) untersucht. Zur Auswertung der Daten wird für jeden Sensor und jede Messung (reflektierende, schwarze und weiße Pappe) die Punkte herausgefiltert, die relevant sind. Also die Punkte, an denen sich der entsprechend reflektierende Karton auf der Stellwand befindet. Anschließend folgt eine Mittelwertbildung aus der Intensität bzw. der Echopulsweite an allen relevanten Punkten und den zehn Wiederholungen. Die sich daraus ergebenden Werte sind in der folgenden Abbildung 4-8 dargestellt. Aufgezeigt ist die Echopulsweite (Ibeo Lux1 und Lux4) bzw. die Intensität (VLP-32 und VLP-16) aufgetragen über den jeweiligen Kartontyp. Die beiden y-Achsen sind so skaliert, dass sie den relevanten Messbereich zeigen.

Aus dem Plot geht hervor, dass Echopulsweite und Intensität ein ähnliches Verhalten auf die drei unterschiedlichen stark reflektierenden Materialien zeigen. Auch wenn die Reaktion der Velodyne Sensoren intensiver ist. Die Intensität fällt auf ca. 20% des maximalen Wertes ab und die Echopulsweite auf ca. 45%. Beide Sensoren können jedoch nicht zwischen der weißen Pappe und der grauen Stellwand unterscheiden. Die Intensität bzw. die Echopulsweite ist in beiden Fällen gleich.

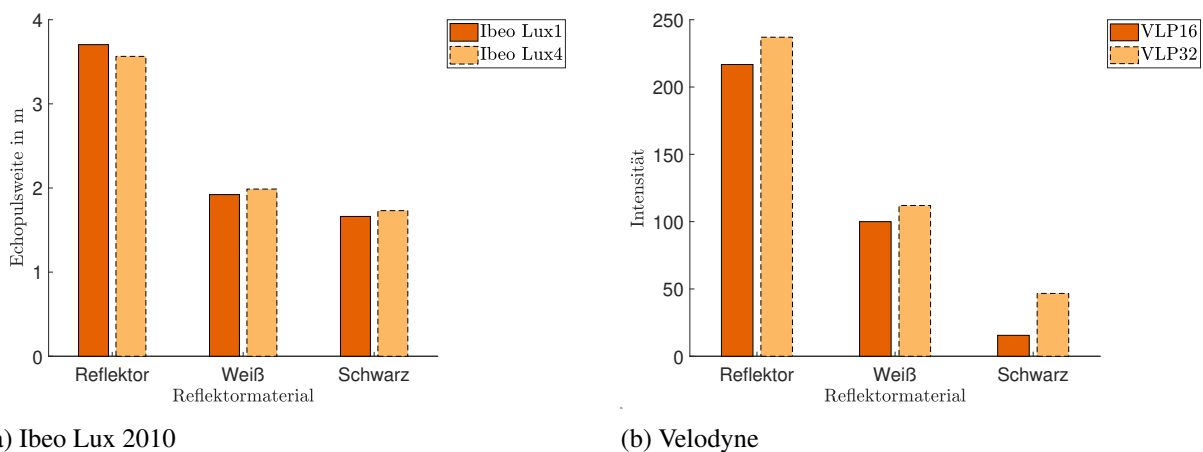


Abbildung 4-8: Darstellung der gemittelten Echopulsweite und Intensität über die drei verschiedenen reflektierenden Objekte, Karton mit Reflektorklebeband, weißer Karton und schwarzer Karton.

Im Versuch zeigt sich eine besondere Auffälligkeit, diese ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Sie ist auf Reproduzierbarkeit überprüft. Abbildung 4-9 zeigt einen Ausschnitt der Punktwolke des Ibeo Lux 2010 Lux4 auf der Stellwand.

Der obere markierte Punkt entspricht dem Strahl, in dem sich der Karton mit Reflektor befindet. Jedoch ragt dieser ein gewisses Stück in den darunter liegenden Strahl hinein. Dies führt zu einer Verschiebung der Punkte im darunterliegenden Strahl um ca. 10 cm in x-Richtung, obwohl sich der Strahl vollständig auf der Kartonwand befindet (unterer Marker). Eine Vermutung ist, dass sich der Abstand durch die Differenz der Echopulsweite erklären lässt. Diese liegt jedoch bei ca. 2 m.

Der Grund für diesen Effekt lässt sich im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig erklären und sollte weiter untersucht werden, da er auch in ähnlicher Erscheinung bei den Velodyne Sensoren auftritt.

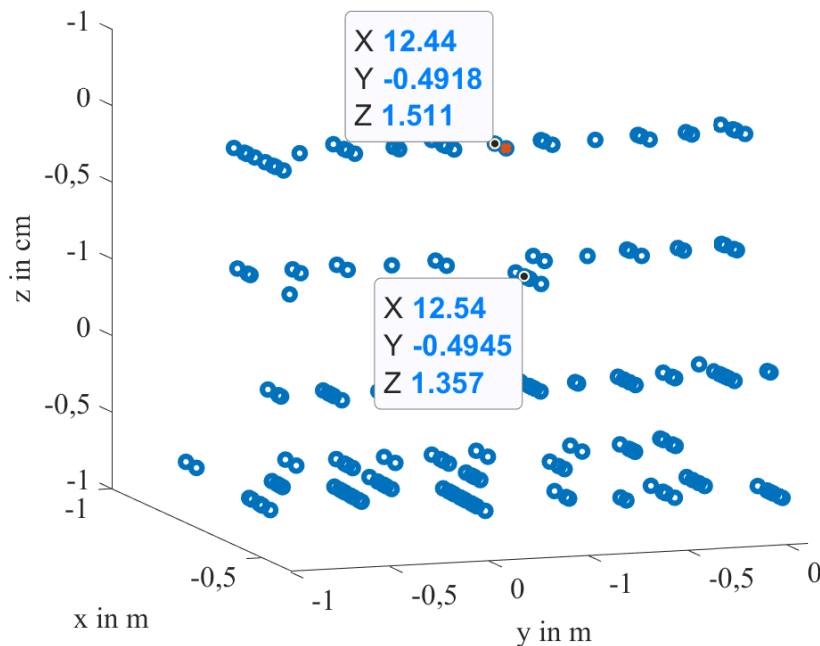


Abbildung 4-9: Punktwolke des Ibeo Lux 2010 mit falscher Distanz im zweiten Layer von oben. Der relevante Punkt wird durch den unteren Marker hervorgehoben. Der obere Marker zeigt die korrekte Position des obersten Layers an.

## 4.5 Versuch 3: Korrelation der Echopulsweite und Intensität bzgl. der Objektgröße

### 4.5.1 Ziel

In Versuch 3 wird der Einfluss der Größe eines Reflektors des gleichen Materials untersucht. Dabei wird die Wirkung auf die Echopulsweite der Ibeo Sensoren und auf die Intensität der Velodyne Sensoren betrachtet.

Dieser Versuch ergänzt Versuch 2. Ziel ist es, ein besseres Verständnis vom Verhalten der Echopulsweite und der Intensität zu erhalten. Zusätzlich wird mit dem Versuch gezeigt werden, wie wichtig eine Berücksichtigung der Strahlaufweitung in manchen Situationen ist. Es können selbst kleine Reflektoren die Messgrößen beeinflussen.

### 4.5.2 Durchführung

#### Details

- Distanz zwischen Sensor und Stellwand: 8 m und 11 m
- Messinstrument: PeakTech 2802, EOS 550D
- Sensoren: Ibeo Lux 2010 (Generation Lux 4 & Lux 1), Velodyne VLP-32, Velodyne VLP-16,
- Ziel: Stellwand bzw. ein mit Reflektorklebeband beklebter Karton in drei Größen.

- Wiederholungen: 10
- Umgebungsbedingungen: Vorlesungsraum, abgedunkelt

## Vorgehen

Der Sensor und die Stellwand sind, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, positioniert und konfiguriert.

Auf die Stellwand wird eines der drei verschieden großen Objekte in die beleuchtete Fläche eines Strahls geklebt. Die exakte Position im Strahl ist nicht fest definiert, jedoch soll sich das jeweilige Objekt möglichst vollständig im Strahlkegel befinden. Die korrekte Positionierung des Objekts wird durch Testaufnahmen mit der Kamera sichergestellt. Dabei wird die Objektposition durch das aufgenommene Infrarotbild der Kamera überprüft. Passt die Position nicht, wird sie geändert und ein neues Foto erstellt. Die Größen der Objekte sind der Tabelle 4-3 zu entnehmen und beziehen sich auf die beiden Messdistanzen von 8 m und 11 m. Die Größe der Objekte unterscheidet sich je nach Sensorhersteller.

Tabelle 4-3: Auflistung der verschiedene Reflektorgößen für die jeweilige Sensorkategorie.

Sensorkategorie	Objektkategorie	Länge in [cm]	Breite in [cm]
Ibeo	groß	28	2,8
Ibeo	mittel	10	2
Ibeo	klein	2	2
Velodyne	groß	6	3
Velodyne	mittel	3	1,5
Velodyne	klein	1	1

Anschließend wird der Raum abgedunkelt und die Messung durch die vom jeweiligen Sensorhersteller bereitgestellte Software gestartet. Diese wird insgesamt zehnmal durchgeführt, indem die Aufnahme gestoppt und wieder neu gestartet wird. Eine Aufnahme dauert ca. 8 s und wird zur späteren Auswertung abgespeichert.

### 4.5.3 Ergebnisse

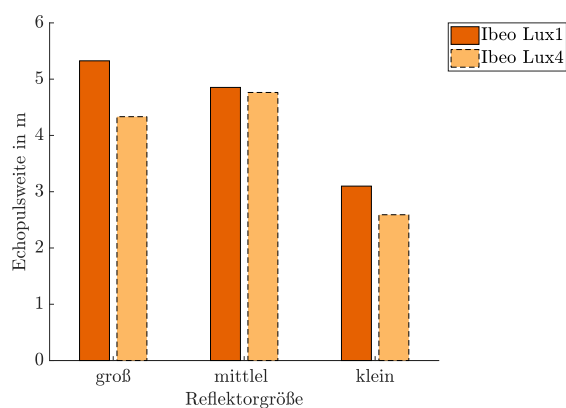
In Versuch 3 wird der Einfluss von verschieden großen, aber gleich gut reflektierenden Objekten untersucht. Zusätzlich werden auch hier die Einflüsse auf Echopulsweite und Intensität miteinander verglichen.

Zur Auswertung des Versuchs wird ähnlich wie zuvor bei Versuch 2 vorgegangen. Es wird für jeden Sensor und jede Messung (Reflektor groß, Reflektor mittel, Reflektor klein) die Punkte herausgefiltert, die relevant sind. Also die Punkte, an denen sich der entsprechend reflektierende Karton auf der Stellwand befindet. Anschließend folgt eine Mittelwertbildung aus der Intensität bzw. der Echopulsweite an allen relevanten Punkten und den zehn Wiederholungen.

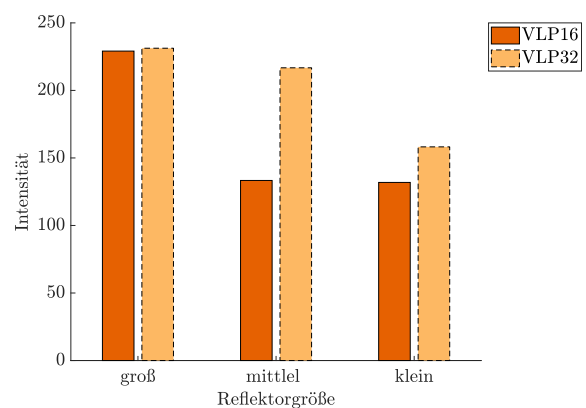
In Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 sind diese Werte für alle vier Sensoren dargestellt. In Ab-

bildung 4-10 ist die Distanz von 8m und in Abbildung 4-11 die Distanz von 11 m ausgewertet. Die Echopulsweite bzw. die Intensität sinkt für beide Distanzen in den meisten Fällen mit geringerer Größe des Reflektors. Die Echopulsweite der beiden IbeoLux Sensoren sinkt bei 8m auf ca. 55% des Maximalwerts des großen Reflektors, die Intensität der beiden Velodyne Sensoren auf ca. 65%. Bei 11m zeigt sich ein ähnliches Bild. Eine Ausnahme bildet der VLP-32 bei 11m. Hier fällt die Intensität mit abnehmender Größe des Reflektors nur leicht ab. Bei einer Distanz von 11m steigt die Echopulsweite beim Ibeo Lux 4 zwischen dem großen und mittleren Reflektor an. Der Grund für diese Anomalien sind vermutlich falsch platzierte Reflektoren in den Versuchen.

Abschließend lässt sich sagen, dass Echopulsweite und Intensität sich bei der Reduzierung der Größe des Reflektors ähnlich verhalten.

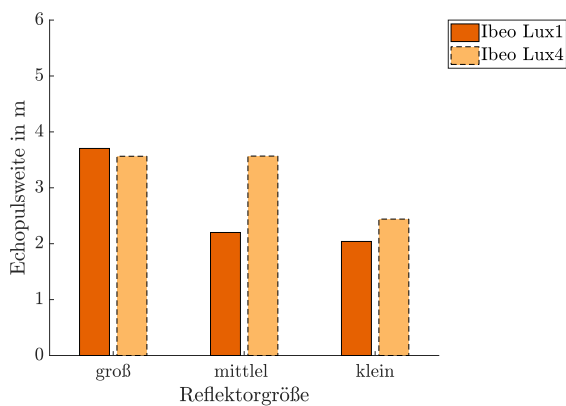


(a) Ibeo Lux 2010

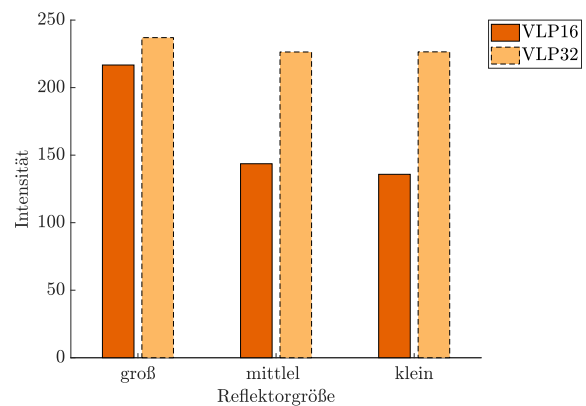


(b) Velodyne

Abbildung 4-10: Verlauf der Echopulsweiten bzw. der Intensitäten für verschieden große Reflektoren. Dargestellt für eine Distanz von 8m.



(a) Ibeo Lux 2010



(b) Velodyne

Abbildung 4-11: Darstellung der gemessenen Echopulsweiten bzw. der Intensitäten für verschieden große Reflektoren. Dargestellt für eine Distanz von 11 m.

In Abbildung 4-12 und 4-13 sind die für den jeweiligen Strahl verschiedenen gemittelten Echopulsweiten bzw. Intensitäten für zehn Wiederholungen dargestellt. Abgebildet sind die Daten des Ibeo

Lux 2010 Lux4 in Abb. 4-12 und des Velodyne VLP-32 in Abb. 4-13 jeweils bei einer Distanz von 8m.

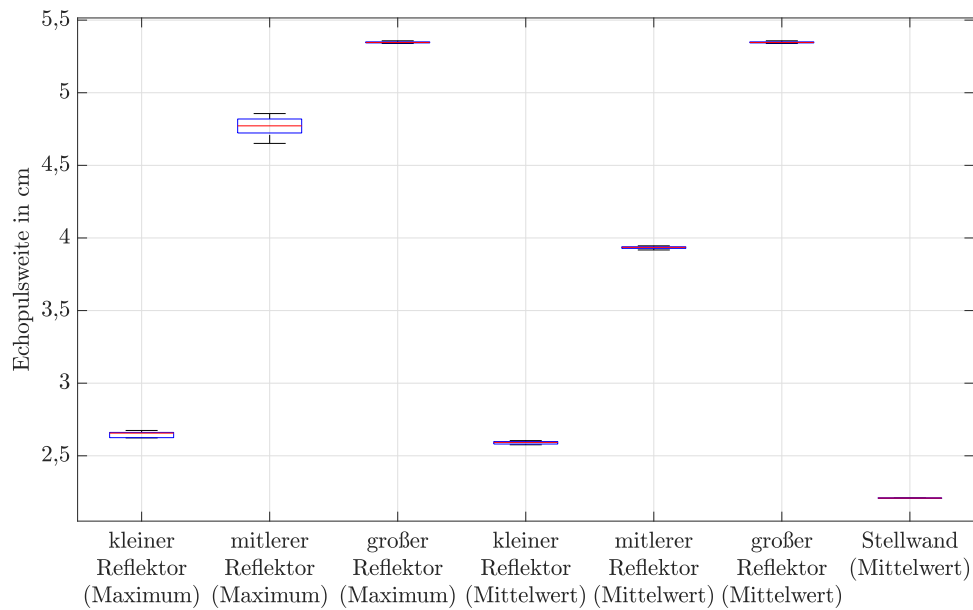


Abbildung 4-12: Darstellung der gemessenen Echopulsweiten des Lux4 (Maximalwerte und Mittelwerte) für verschieden große Reflektoren. Die Abbildung beinhaltet die Ergebnisse der zehn Wiederholungen für eine Distanz von 8m.

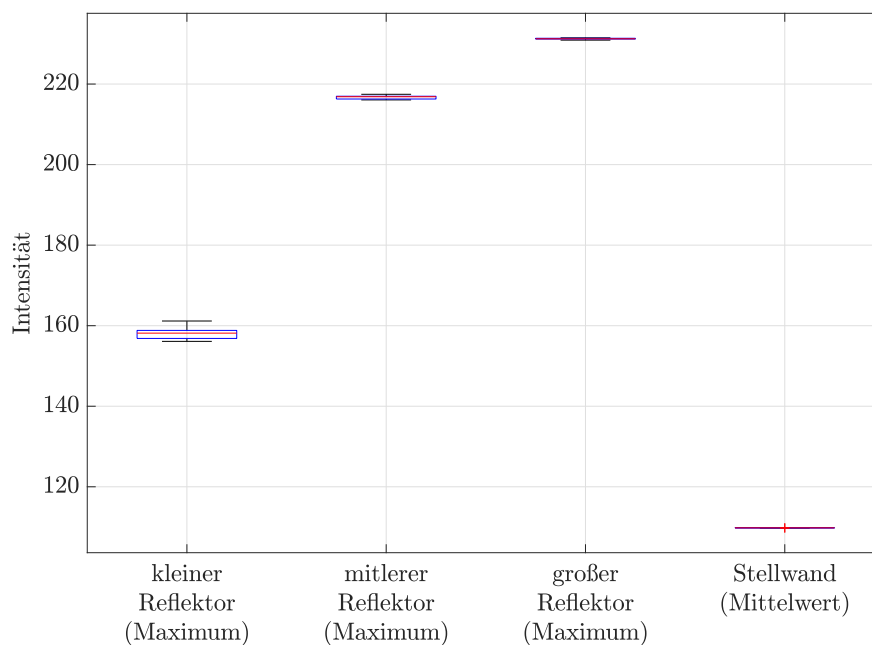


Abbildung 4-13: Darstellung der gemessenen Intensitäten des VLP-32 (Maximalwerte und Mittelwerte) für verschieden große Reflektoren. Die Abbildung beinhaltet die Ergebnisse der zehn Wiederholungen für eine Distanz von 8m.

---

In Abb. 4-12 entsprechen die drei ersten Datenpunkte von links nach rechts der gemessenen Echopulsweite am kleinen, am mittleren und am großen Reflektor. Für jeden Datenpunkt zeigt die zentrale Markierung den Median der zehn Wiederholungen an und der untere und obere Rand der Kästchen zeigt das 25% bzw. 75% Quartil an. Die Antennen (Whisker) reichen bis zum Maxima bzw. Minima, die nicht als Ausreißer betrachtet werden. Die dargestellten Werte sind die Mittelwerte aus den größten aufgetretenen Echopulsweiten.

Die drei folgenden Datenpunkte in Abbildung 4-12 entsprechen dem Mittelwert aller im Strahl gemessenen Echopulsweiten für den kleinen, mittleren und den großen Reflektor. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Echopulsweiten insbesondere bei dem mittleren Reflektor Unterschiede zeigen, obwohl sie dem gleichen Strahl zuzuordnen sind. Der Mittelwert der gesamten Punkte liegt dennoch für beide Reflektoren über dem Mittelwert aller Punkte auf der Stellwand (letzter Datenpunkt von links).

Dies führt zu dem Schluss, dass der Sensor eine gewisse Separierbarkeit von unterschiedlich gut reflektierenden bzw. großen Objekten im Strahl besitzt, obwohl sie sich in der gleichen Distanz befinden.

Beim Velodyne Sensor in Abb. 4-13 sind die drei ersten Datenpunkte von links nach rechts der gemessenen Intensität am kleinen, am mittleren und am großen Reflektor abgebildet. Die dargestellten Werte sind die Mittelwerte aus den größten aufgetretenen Intensitäten. Der rechte Datenpunkt entspricht dem Mittelwert aller gemessenen Intensitäten auf der Stellwand. Für jeden Datenpunkt zeigt die zentrale Markierung den Median für die zehn Wiederholungen an und der untere und obere Rand der Kästchen zeigt das 25% bzw. 75% Quartil an. Die Antennen (Whisker) reichen bis zum Maxima bzw. Minima, die nicht als Ausreißer betrachtet werden.

Zum Zeitpunkt des Versuchs bestand keine Möglichkeit, mit Hilfe der Kamera zwischen den einzelnen Strahlen zu unterscheiden. Daher lässt sich für diesen Sensor nicht sagen, ob er die gleiche Fähigkeit in der Separierbarkeit zwischen zwei Materialien besitzt wie der Ibeo Lux 2010. Insbesondere spielt hier die Tatsache, dass der Sensor bei jeder Messung ein anderen Bereich abtastet, eine Rolle. Es lässt sich jedoch aus der Abb. 4-13 Ableiten, dass die gemessene Intensität abhängig von der Objektgröße des Reflektors im Strahl ist.

## **4.6 Versuch 4: Korrelation der Echopulsweite und Intensität bzgl. des Umgebungslichts**

### **4.6.1 Ziel**

Das Ziel des Versuchs ist es, die Auswirkung des Umgebungslichtes auf die Intensität (Velodyne) und die Echopulsweite (Ibeo) zu untersuchen. Dazu wird der gleiche Versuchsablauf im abgedunkelten Raum und bei Umgebungslicht durchgeführt. Ziel ist hier, neben dem besseren Verständnis der Messgrößen, einen ersten Eindruck davon zu bekommen, wie relevant der Einfluss von Umgebungslicht für das Sensormodell ist.



---

## 4.6.2 Durchführung

### Details

- Distanz zwischen Sensor und Stellwand: 8 m und 11 m
- Messinstrument: PeakTech 2802, EOS 550D
- Sensoren: Ibeo Lux 2010 (Generation Lux 4 & Lux 1), Velodyne VLP-32, Velodyne VLP-16,
- Ziel: Stellwand bzw. ein mit Reflektorklebeband beklebter Karton.
- Wiederholungen: 10
- Umgebungsbedingungen: Vorlesungsraum, abgedunkelt und bei Tages- und Kunstlicht

### Vorgehen

Der jeweilige Sensor und die Stellwand sind, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, positioniert und konfiguriert.

Für den Versuch wird derselbe, jeweils den Strahlkegel ausfüllende, mit Reflektorfolie beklebte Karton aus Versuch 2 verwendet (siehe Tabelle 4-2). Die korrekte Positionierung des Reflektors wird durch Testaufnahmen mit der Kamera sichergestellt. Dabei wird die Objektposition durch das Infrarotbild der Kamera überprüft. Passt die Position nicht, wird sie geändert und ein neues Foto erstellt.

Anschließend wird der Raum abgedunkelt und die Messung durch die vom jeweiligen Sensorhersteller bereitgestellte Software gestartet. Diese wird insgesamt zehnmal durchgeführt, indem die Aufnahme gestoppt und wieder neu gestartet wird. Eine Aufnahme dauert ca. 5 s und wird zur späteren Auswertung abgespeichert. Anschließend wird das Raumlicht eingeschaltet und die Rollläden hochgefahren, um auch Tageslicht mit einzubeziehen. Die Messung wird wieder zehnmal durchgeführt, ohne weitere Veränderungen am Versuchsbau vorzunehmen.

## 4.6.3 Ergebnisse

In Versuch 4 wird untersucht wie sich ein dunkler bzw. ein hell beleuchteter Raum auf die gemessene Echopulsweite und Intensität der Sensoren auswirkt. Wie bei den Versuchen 2 und 3 zuvor werden zur Auswertung für jeden Sensor und jede Messung (hell und dunkel) die relevanten Punkte herausgefiltert. Also die Punkte, an denen sich der entsprechend reflektierende Karton auf der Stellwand befindet. Anschließend folgt eine Mittelwertbildung aus der Intensität bzw. der Echopulsweite aller relevanten Punkte und den zehn Wiederholungen.

In Abbildung 4-14 sind für die beiden Ibeo Sensoren Lux 1 und Lux 4 für jeweils 11 m und 8 m die Echopulsweiten im Dunkeln (orange, jeweils erster Balken) und Hellen (gelb, jeweils zweiter Balken) aufgetragen. Zusätzlich ist jeweils die gemittelte Echopulsweite der gesamten Stellwand für einen dunklen (helles lila, jeweils dritter Balken) und hellen (lila, jeweils vierter Balken) Raum dargestellt.

In Abbildung 4-15 sind die gleichen Werte für den VLP-16 und den VLP-32 dargestellt. Die Unterschiede fallen gering aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht viel Tageslicht in den Raum fällt. Der Infrarotanteil in künstlichem Licht ist im Vergleich zu Sonnenlicht sehr gering. Die Echopulsweite zeigt eine Reaktion auf den hellen Raum, wohingegen die Intensität der Velodyne Sensoren keine Reaktion zeigt.

Des Weiteren erschließt sich aus der Abbildung, dass sich die Echopulsweiten von Lux 1 und Lux 4 unterscheiden, obwohl gleiche Bedingungen vorliegen. Bei den beiden Velodyne Sensoren sind keine großen Unterschiede zu erkennen.

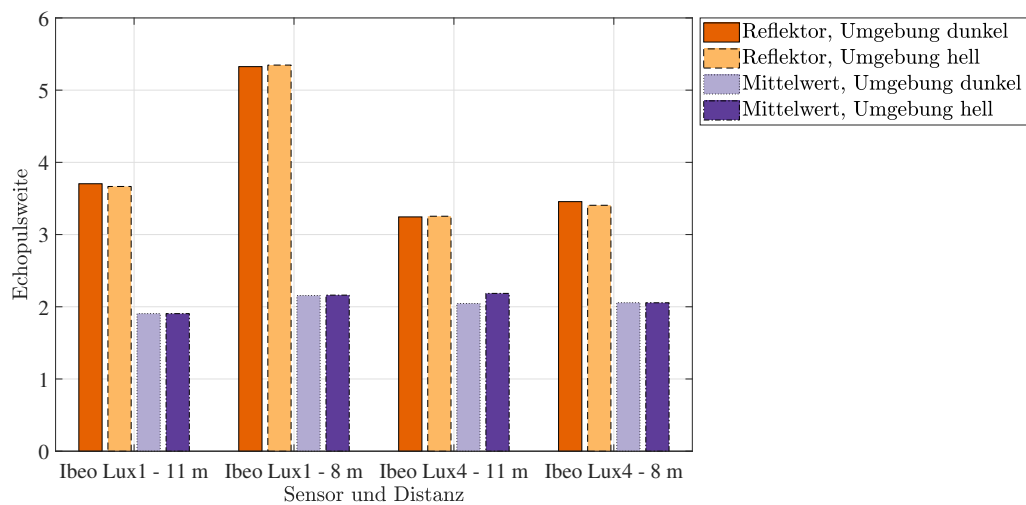


Abbildung 4-14: Dargestellt ist die durchschnittlich gemessene Echopulsweite für den Ibeo Lux1 und Lux4 bei 8 m und 11 m Entfernung bei Licht und bei Dunkelheit.

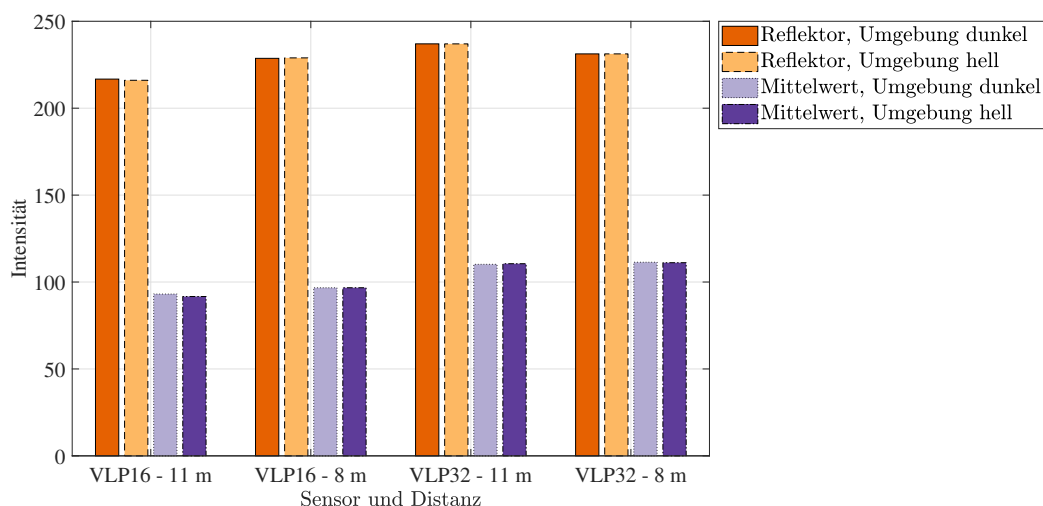


Abbildung 4-15: Dargestellt ist die durchschnittlich gemessene Intensität für den Velodyne VLP-32 und VLP-16 bei 8 m und 11 m Entfernung bei Licht und bei Dunkelheit.

---

## 4.7 Versuch 5: Mehrzielfähigkeit an Glasscheiben

### 4.7.1 Ziel

In diesem Versuch wird die Mehrzielfähigkeit der Sensoren anhand von zwei unterschiedlichen Glasscheiben und eines dahinter befindlichen Reflektors untersucht. Somit wird überprüft, ob der Sensor Scheibe und Reflektor verlässlich erkennt. Ziel ist es, die Angaben der Hersteller zu überprüfen und zu beurteilen, ob die Mehrzielfähigkeit für das Sensormodell relevant ist.

### 4.7.2 Durchführung

#### Details

- Distanz zwischen Sensor und Stellwand: 11 m
- Distanz zwischen Sensor und Scheibe: ca. 6 m
- Messinstrument: PeakTech 2802, EOS 550D
- Sensoren: Ibeo Lux 2010 (Generation Lux4), Velodyne VLP-16,
- Ziel: Stellwand bzw. ein mit Reflektorklebeband beklebter Karton, sowie eine einfach verglaste Scheibe und eine Frontscheibe eines Pkw.
- Wiederholungen: 10
- Umgebungsbedingungen: Vorlesungsraum, abgedunkelt

#### Vorgehen

Der jeweilige Sensor und die Stellwand sind, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, positioniert und konfiguriert.

Für den Versuch wird derselbe, jeweils den divergierten Lichtstrahl ausfüllende, mit Reflektorfolie beklebte Karton aus Versuch 2 verwendet (siehe Tabelle 4-2). Die korrekte Positionierung des Reflektors auf der Stellwand wird durch Testaufnahmen mit der Kamera sichergestellt. Dabei wird die Objektposition durch das Infrarotbild der Kamera überprüft. Passt die Position nicht, wird sie geändert und ein neues Foto erstellt.

Beide Scheiben werden jeweils auf halber Strecke zur Stellwand, bei ca. 6 m, aufgestellt. Die Scheiben sind beide verschmutzt. Die Pkw-Scheibe ist zusätzlich an manchen Stellen gesplittert. Die Position der Scheiben ist in Abbildung 4-16 gezeigt. Mit Hilfe der Kamera ist sichergestellt, dass die untersuchten Lichtstrahlen vollständig durch die Scheibe gehen. Die Scheiben werden jeweils durch zwei Personen in Position gehalten. Anschließend wird der Raum abgedunkelt und die Messung durch die vom jeweiligen Sensorhersteller bereitgestellte Software gestartet. Diese wird insgesamt zehnmal durchgeführt, indem die Aufnahme gestoppt und wieder neu gestartet wird. Eine Aufnahme dauert ca. 5 s und wird zur späteren Auswertung abgespeichert.



(a) Pkw-Scheibe



(b) 1-fach verglaste Scheibe

Abbildung 4-16: Versuchsaufbau von Versuch 5 mit Position der Glasscheiben.

### 4.7.3 Ergebnisse

Ziel von Versuch 5 ist die Untersuchung der Mehrzielfähigkeit des Ibeo Lux 2010 Lux4 und des Velodyne VLP-16 an einer Pkw-Frontscheibe und an einer einfachen Glasscheibe, die sich beide auf halber Distanz zwischen dem Sensor und der Stellwand mit Reflektor befinden. An der Stellwand befindet sich ein Reflektor, der mindestens einen Strahl des Sensors voll ausfüllt.

#### Ibeo Lux 2010

Der Ibeo Lux 2010 besitzt laut Hersteller, wie bereits beschrieben, eine Mehrzielfähigkeit auch bei Glasscheiben. Er kann bis zu drei Echos und damit auch bis zu drei Objekte pro Strahl unterscheiden. In Abbildung 4-17 ist die gemittelte Anzahl der drei gemessenen Echos für die jeweils zehn Wiederholungen dargestellt. Dabei wird jeder Punkt berücksichtigt, der sich auf oder vor der Stellwand befindet.

Die orangen (jeweils ersten) Balken in Abbildung 4-17 entsprechen den Messungen mit Pkw-Scheibe und die gelben (jeweils zweiten) Balken den Messungen mit der einfach verglasten Scheibe. Aus der Abbildung lässt sich ableiten, dass der Sensor robust Scheibe und Pkw-Scheibe sowie das Zielobjekt erkennt, da für beide Objekte eine ausreichende Anzahl an Echos zurückgegeben wird. Die Anzahl der zweiten Echos fällt jedoch um ca. die Hälfte der ersten Echos zurück. Auch lässt sich ein Unterschied zwischen Pkw-Scheibe und Scheibe erkennen. Die Anzahl der detektierten Punkte sinkt für die Pkw-Scheibe und das Zielobjekt. Dies ist vermutlich auf die infrarotabsorbierenden Eigenschaften der Pkw-Frontscheibe zurückzuführen. Eine Darstellung der Punktwolke für die Autoscheibe ist dem Anhang A.1 zu entnehmen. In der Abbildung A-1 (a) lassen sich die Scheibe und die Stellwand gut identifizieren.

In Abbildung 4-18 sind die Mittelwerte der Echopulsweite des Ibeo Lux 2010 für die zehn Wiederholungen des Versuchs dargestellt. Der erste und der zweite Datenpunkt von links nach rechts entspricht jeweils dem Mittelwert der detektierten Echopulsweiten auf dem Reflektor, der sich auf der Stell-

wand befindet. Bei dem ersten Datenpunkt befindet sich die Pkw-Scheibe auf halber Distanz vor dem Reflektor, beim zweiten Datenpunkt die Pkw-Scheibe. Für jeden Datenpunkt zeigt die zentrale Markierung den Median der zehn Wiederholungen an. Der untere und obere Rand der Kästchen zeigt das 25% bzw. 75% Quartil an. Die Antenne (Whisker) reichen bis zum Maxima bzw. Minima, die nicht als Ausreißer betrachtet sind. Die Ausreißer sind einzeln mit dem Symbol + dargestellt.

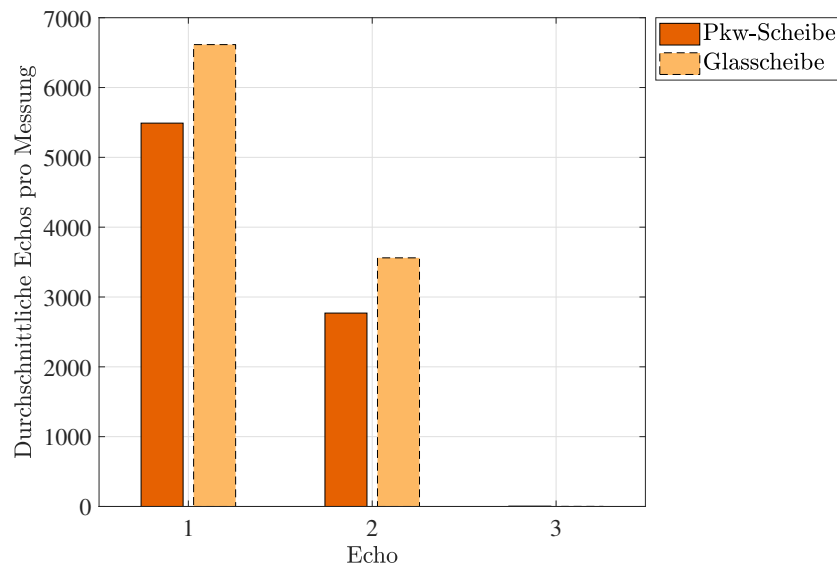


Abbildung 4-17: Aufgezeigt sind die durchschnittlich gemessenen Echos des Ibeo Lux 2010 Sensors für den Versuch mit Glasscheibe und mit Pkw-Scheibe.

Aus der Darstellung ergibt sich, dass die gemessene Echopulsweite bei der Autoscheibe im Vergleich zur Glasscheibe sinkt und der Reflektor damit schlechter zurückreflektiert. Der dritte Datenpunkt entspricht dem Mittelwert der Echopulsweiten der Punkte auf der Pkw-Scheibe und der vierte Datenpunkt denen auf der Glasscheibe. Da die Punkte auf der Autoscheibe eine niedrigere Echopulsweite besitzen als die auf der Glasscheibe, scheint die Pkw-Scheibe das Infrarotlicht stärker zu absorbieren als die einfache Glasscheibe. Auch diese Tatsache ist der infrarotabsorbierenden bzw. reflektierenden Eigenschaft der Autoscheibe zuzuschreiben.

Die Mehrzielfähigkeit des Ibeo Lux 2010 Lux 4 wird bereits in der Masterarbeit von Marina Zirulnik<sup>82</sup> untersucht. Als Ergebnis stellt sich heraus, dass der Ibeo Sensor entgegen der Herstellerangaben keine Mehrzielfähigkeit besitzt. Dieses Ergebnis widerlegt der Versuch. Die Versuchsbedingungen unterscheiden sich jedoch von denen in diesem Versuch. Das Zielobjekt, ein gut reflektierendes Verkehrsschild, ist in Marina Zirulniks Versuch hinter der Heckscheibe eines Fahrzeugs in einer Distanz von 6m aufgestellt. Heckscheibe und Verkehrsschild stehen jedoch weniger als 1m voneinander entfernt. Im Versuch in dieser Arbeit liegt, wie bereits beschrieben, eine Distanz von ca. 5m zwischen Pkw-Scheibe und Reflektor. Die Vermutung ist, dass der Sensor nicht in der Lage

<sup>82</sup> Zirulnik, M.: Untersuchung der Charakteristik der Mehrzielfähigkeit sowie des Rauschverhaltens eines Automotive LIDAR Sensors (2017), S. 41.

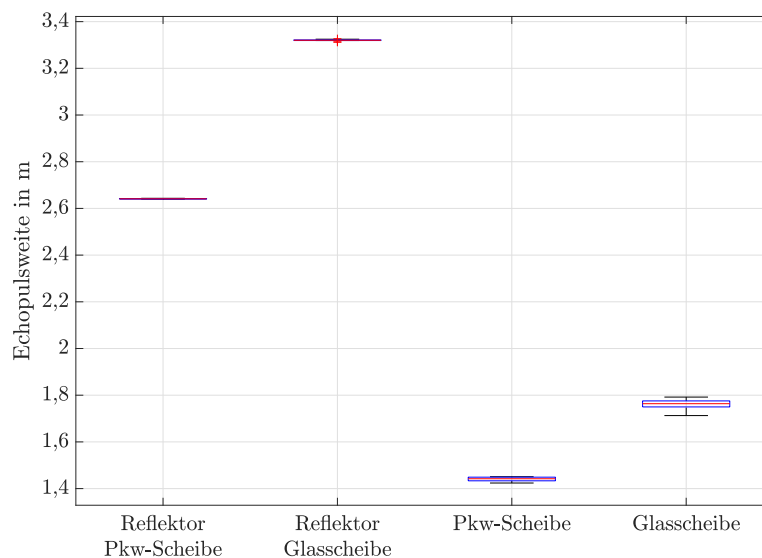


Abbildung 4-18: Dargestellt sind die durch den Ibeo Lux 2010 durchschnittlich gemessenen Echopulsweiten auf der jeweiligen Scheibe und dem Reflektor für zehn Wiederholungen.

ist, bei kurzen Distanzen zwischen mehreren unterschiedlich entfernten Objekten zu separieren. Die allgemeine Mehrzielfähigkeit ist jedoch vorhanden.

### Velodyne VLP-16

Der Velodyne VLP-16 besitzt wie bereits in Abschnitt 4.1.1 beschrieben laut Herstellerangaben eine Mehrzielfähigkeit im Modus „Dual Return“. Bei einer minimalen Distanz von 1 m gibt er in der entsprechenden Situation den letzten und den stärksten Rückgabewert aus oder den letzten, den stärksten und den zweitstärksten Wert. Die im Datenblatt beschriebenen Situationen entsprechen jedoch der Situation einer Zweiteilung des Strahls an einer Kante und damit nicht der hier dargestellten.

In Abbildung 4-19 ist der Mittelwert der Anzahl der Punkte aus den zehn Wiederholungen aufgezeigt, die den Reflektor an der Stellwand oder eine der Scheiben getroffen haben. Die sich aus dem Versuch mit der Pkw-Scheibe ergebenden Punkte sind als orange (jeweils erste) Balken und die sich aus dem Versuch mit der Glasscheibe ergebenden Punkte sind als gelbe (jeweils zweite) Balken dargestellt. Eine Aussage darüber, ob es sich bei dem Punkt um die erste oder die zweite Reflexion handelt, ist durch die Informationen der Sensordaten nicht möglich. Daher lässt sich nicht feststellen, ob es sich bei den Punkten nur um einzelne Detektionen der Scheiben oder des Zielobjekts handelt oder um die Detektion beider Objekte in einem Strahl. Dennoch lässt sich aus den Daten schlussfolgern, dass der Sensor die Scheibe und das Zielobjekt detektiert. Autoscheibe und Glasscheibe werden mit nahezu gleich vielen Punkten erfasst und der Reflektor mit etwas weniger Punkten. Wie beim Ibeo Lux wird das Zielobjekt durch die einfachverglaste Scheibe besser detektiert als durch die Autoscheibe.

In Abbildung 4-20 sind die gemittelten Intensitäten, die an den jeweiligen Scheiben und dem Reflektor gemessen wurden, für die zehn Wiederholungen dargestellt. Aus der Darstellung ergibt sich, dass die gemittelten Intensitäten der Punkte, die auf dem Reflektor liegen bei der Glasscheibe, zweiter

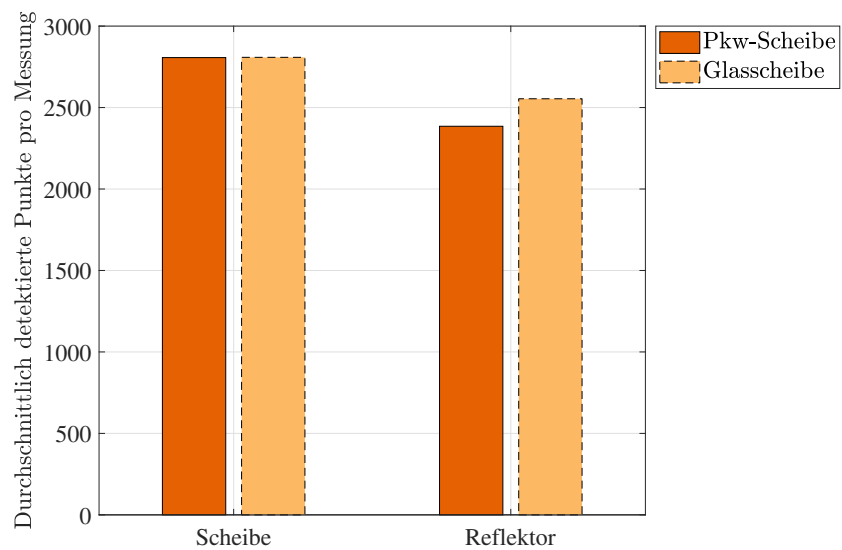


Abbildung 4-19: Aufgezeigt sind die jeweils durchschnittlich gemessenen Punkte des Velodyne VLP-16 Sensors für den Versuch mit Glasscheibe und Pkw-Scheibe.

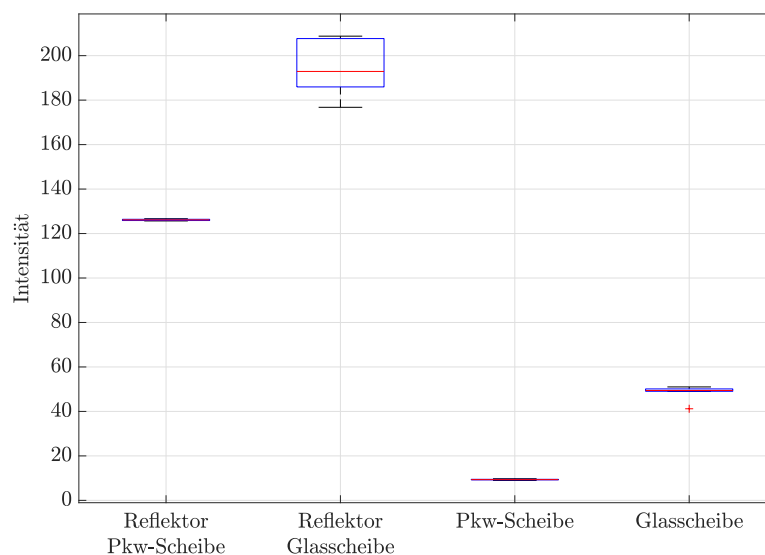


Abbildung 4-20: Dargestellt sind die durch den Velodyne VLP-16 durchschnittlich gemessenen Intensitäten auf der jeweiligen Scheibe und dem Reflektor für zehn Wiederholungen.

---

Datenpunkt von links nach rechts, über denen der Autoscheibe, erster Datenpunkt, liegen. Dies deutet auch auf die infrarotreflektierenden bzw. -absorbierenden Eigenschaften der Pkw-Scheibe hin. Für jeden Datenpunkt zeigt die zentrale Markierung den Median der zehn Wiederholungen an. Der untere und obere Rand der Kästchen zeigt das 25% bzw. 75% Quartil an. Die Antennen (Whisker) reichen bis zum Maxima bzw. Minima, die nicht als Ausreißer betrachtet sind. Die Ausreißer sind einzeln mit dem Symbol + dargestellt. Im Gegensatz zur Messung beim Ibeo Lux liegt die gemittelte Intensität der Punkte auf der Glasscheibe, vierter Datenpunkt, deutlicher über denen auf der Autoscheibe, dritter Datenpunkt. Ein Grund hierfür könnten die unterschiedlichen Messprinzipien der beiden Sensoren sein.

Final lässt sich sagen, dass der Velodyne Sensor eine grundlegende Fähigkeit besitzt, die Scheiben und den dahinter befindlichen Reflektor gleichzeitig zu detektieren, jedoch ist die Detektion der Scheiben nicht sehr robust. Dies geht aus der im Anhang A.1 in Abbildung A-1 (b) dargestellten Punktwolke hervor. Hier ist das Zielobjekt zu identifizieren, bei der sich davor befindlichen Scheibe sind jedoch fehlende Datenpunkte auszumachen. Warum die Anzahl zwischen den Punkten auf der Scheibe und dem Zielobjekt ähnlich ist, lässt sich abschließend aus den vorhandenen Daten nicht klären und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

## **4.8 Versuch 6: Mehrzielfähigkeit an zwei Objekten**

### **4.8.1 Ziel**

In Versuch 6 wird untersucht, ob der Ibeo Lux 2010 in der Lage ist, zwei Objekte mit unterschiedlichen Distanzen zum Sensor in einem aufgeweiteten Strahl zu identifizieren. Diese Fähigkeit wird laut Hersteller unterstützt und ist ein elementarer Effekt der Strahlaufweitung, da der Sensor in der Lage ist, mehrere in einem Strahl befindliche Objekte zu detektieren. Diese Fähigkeit erhöht die Relevanz der Unterstützung der Strahlaufweitung durch ein Lidar-Sensormodell, da dies die Anzahl der detektierten Objekte beeinflusst.

Der Velodyne VLP-16 bzw. VLP-32 besitzt laut Herstellerangaben, wie bereits in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, eine Mehrzielfähigkeit. Eine Untersuchung der Mehrzielfähigkeit eines Strahls ist mit der zur Verfügung stehenden Ausrüstung an den Velodyne Sensoren nicht möglich. Dies liegt insbesondere daran, dass bei den Velodyne Sensoren aufgrund der Regelungenauigkeit für die Drehzahl des Motors in mehreren Umdrehungen nicht der gleiche Punkt vom gleichen Strahl getroffen wird. Des Weiteren ist der Strahl im Vergleich zum Ibeo Lux 2010 wesentlich stärker gebündelt.

### **4.8.2 Durchführung**

#### **Details**

- Distanz zwischen Sensor und Stellwand: 11 m
- Distanz zwischen mit Reflektor beklebtem Aluprofil und Sensor: ca. 6 m



- Messinstrument: PeakTech 2802, EOS 550D
- Sensoren: Ibeo Lux 2010 (Generation Lux 4)
- Ziel: Stellwand mit befestigtem Reflektor und ein mit Reflektorklebeband beklebter Karton an einem Alu-Profil
- Wiederholungen: 10
- Umgebungsbedingungen: Vorlesungsraum, abgedunkelt, leichter Einfluss auf Aluprofil durch einfaches Festhalten

## Vorgehen

Der jeweilige Sensor und die Stellwand sind wie in Abschnitt 4.2 beschrieben positioniert und konfiguriert.

Für den Versuch wird derselbe, jeweils dem divergierten Lichtstrahl ausfüllende, mit Reflektorfolie beklebte Karton aus Versuch 2 verwendet (siehe Tabelle 4-2). Die korrekte Positionierung des Reflektors auf der Stellwand wird durch Testaufnahmen mit der Kamera sichergestellt. Dabei wird die Objektposition durch das Infrarotbild der Kamera überprüft. Passt die Position nicht, wird sie geändert und ein neues Foto erstellt.



Abbildung 4-21: Infrarotaufnahme des Strahlenmusters bei Versuch 6. Zu sehen ist der ca. zur Hälfte verdeckte Reflektor in der Mitte des Bildes.

Der zweite Reflektor wird an einem Alu-Profil befestigt und auf halber Strecke bei ca. 6m aufgestellt und so positioniert, dass ungefähr die Hälfte eines Strahls verdeckt wird. Da sich das Aluprofil nicht befriedigend am Boden befestigen ließ, wird es auf eine Sitzreihe gestellt und durch eine Person

festgehalten werden, wodurch eine leichte Bewegung entsteht. Diese ist in Abbildung 4-21 dargestellt. Nur ein Teil des Strahls erscheint abgedunkelt, es wird nicht der gesamte Strahl vollständig verdeckt. Anschließend wird der Raum abgedunkelt und die Messung durch die vom jeweiligen Sensorhersteller bereitgestellte Software gestartet. Diese wird insgesamt zehnmal durchgeführt, indem die Aufnahme gestoppt und wieder neu gestartet wird. Eine Aufnahme dauert ca. 8 s und wird zur späteren Auswertung abgespeichert.

### 4.8.3 Ergebnisse

Ziel von Versuch 6 ist es, die Mehrzielfähigkeit des Ibeo Lux 2010 Lux 4 zu untersuchen, wenn sich ein Reflektor einige Meter vor dem an der Stellwand befestigten Reflektor befindet und zum Teil den Strahl abschattet. Hierzu sind die Daten so gefiltert, dass nur der einzelne Strahl im vierten Layer berücksichtigt wird, der auf den ersten, am Aluprofil befestigten Reflektor und auf den zweiten, an der Stellwand befestigten Reflektor trifft. Wie zuvor beschrieben unterliegt der sich bei ca. 6 m befindliche Reflektor einer leichten Bewegung.

In Abbildung 4-22 ist die gemittelte Echopulsweite von den reflektierten Punkten auf dem Reflektor am Aluprofil (linker Datenpunkt) und dem Reflektor auf der Stellwand (rechter Datenpunkt) für die zehn Wiederholungen dargestellt.

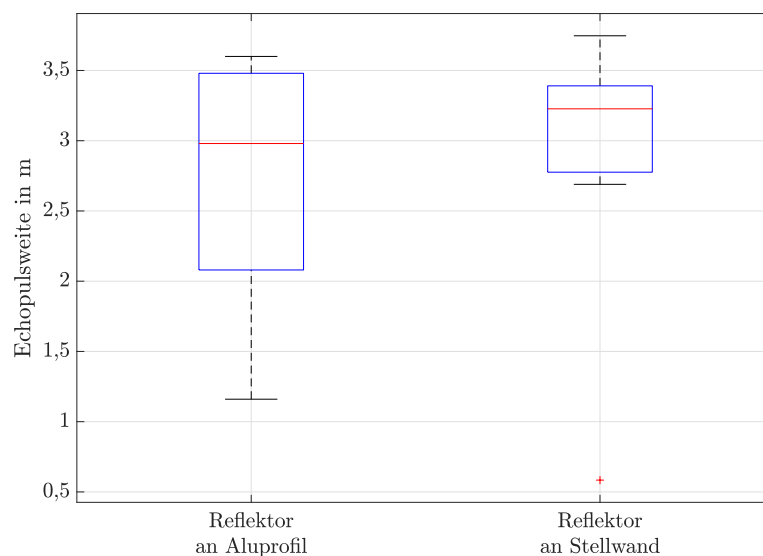


Abbildung 4-22: Darstellung der gemessenen Echopulsweiten auf den Reflektoren an der Stellwand und am Aluprofil für die zehn Wiederholungen.

Für jeden Datenpunkt zeigt die zentrale Markierung den Median der zehn Wiederholungen an. Der untere und obere Rand der Kästchen zeigt das 25% bzw. 75% Quartil an. Die Antennen (Whisker) reichen bis zum Maxima bzw. Minima, die nicht als Ausreißer betrachtet sind. Die Ausreißer sind einzeln mit dem Symbol + dargestellt. Die Echopulsweite schwankt aufgrund der Bewegung des Reflektors am Aluprofil. Der Median liegt für die Echopulsweiten beider Reflektoren in einem ähnlichen

Bereich. Daraus lässt sich schließen, dass der Sensor beide Reflektoren erkennt und die Echopulsweiten jeweils den zwei Entfernungen zuordnen kann, obwohl sich die Objekte nur zum Teil im Strahl befinden.

In Abbildung 4-23 sind die Anzahl der ersten (orange, jeweils erster Balken) und der zweiten Echos (gelb, jeweils zweiter Balken) für jede Wiederholung dargestellt. Der Sensor erkennt somit trotz der Bewegung des Reflektors am Aluprofil zwei Echos und somit beide Reflektoren. Die Anzahl der gemessenen Echos am Reflektor an der Stellwand liegt unter der des Reflektors am Aluprofil. Insgesamt zeigt der Versuch, dass der Sensor grundsätzlich in der Lage ist zwischen zwei sich in einem Strahl und an unterschiedlichen Distanzen befindlichen Objekten zu unterscheiden.

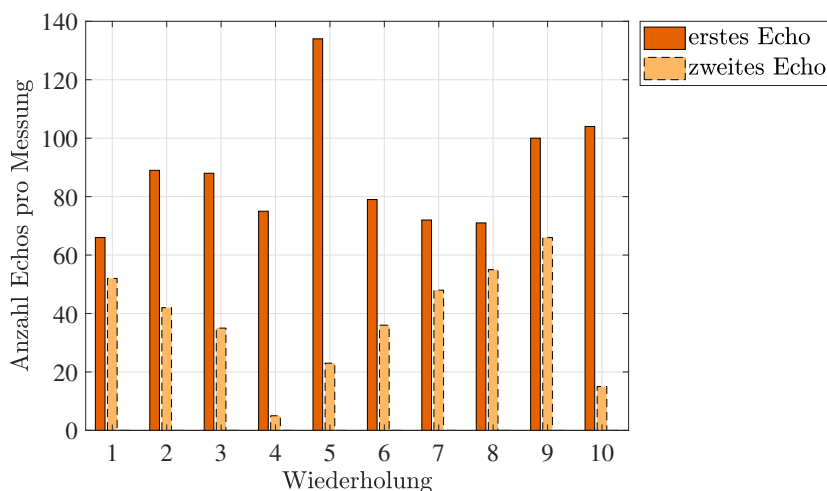


Abbildung 4-23: Strahlmuster des Ibeo Lux 2010 bei einer Entfernung von 11 m. Abgebildet sind zwei Modellreihen bei jeweils unterschiedlichen Belichtungszeiten

## 4.9 Bewertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Versuchen kurz zusammengefasst und in Bezug auf die Implementierung ins Sensormodell beurteilt werden.

Aus Versuch 1 lässt sich zusammenfassend sagen, dass es wie im Falle der Ibeo Lux 2010 und der Scala Baureihe teils deutliche Abweichungen bzgl. der Strahlaufweitung und des Strahlmusters im Vergleich zu denen vom Hersteller beschriebenen Daten im Handbuch gibt. Allerdings kann der Unterschied wie im Falle der beiden Velodyne Sensoren auch eher geringfügig sein. Zusammenfassend zeigt der Versuch wie groß ( $> 5\text{ m}$ ) die Unterschiede zwischen einer Annahme eines infinitesimal kleinen und idealen Strahls und dem realen Strahl, insbesondere bei höheren Entfernungen, sind. Auch wird deutlich, wie wichtig die Berücksichtigung möglichst vieler sensorspezifischer Parameter ist. Diese haben einen Einfluss darauf, ob ein Objekt detektiert wird oder nicht. Aus diesem Grund wird im Folgenden weiter der Fokus auf der Implementierung der Strahlaufweitung und des Strahlmusters liegen sowie der Einbeziehung möglichst vieler Sensorparameter.

---

In Versuch 2 und 3 ergibt sich tendenziell ein ähnliches Verhalten zwischen der Echopulsweite und der Intensität bei einer Messung mit unterschiedlich gut reflektierenden Objekten und unterschiedlich großen Objekten. Trotzdem ist das Verhalten nicht gleich und die Reaktionen auf Veränderungen sind unterschiedlich stark ausgeprägt.

Bei Versuch 4 zeigt sich, dass die gemessenen Intensitäten der Velodyne Sensoren weniger stark auf das Umgebungslicht reagieren als die gemessenen Echopulsweite der Ibeo Sensoren, wenn auch nur minimal. Daher wird bei der Implementierung Echopulsweite und Intensität gleichermaßen nachgebildet. So soll möglichst realitätsnah der Verlauf der Spannungskurve am Empfänger simuliert werden.

In den Versuchen 5 und 6 zeigt sich, dass der Ibeo Lux 2010 und der Velodyne VLP-16 die Fähigkeit der Detektion mehrerer Echos pro Strahl besitzen. Aufgrund der Größe des Strahls des Ibeo Sensors ist es insbesondere für diesen Sensor relevant, diese Eigenschaft abbilden zu können. Daher wird auch die Mehrfachdetektion durch die Strahlaufweitung bei der Erweiterung des Sensormodells berücksichtigt werden.

---

## 5 Implementierung der physikalischen Eigenschaften ins Modell

---

In diesem Kapitel wird das Vorgehen der Implementierungen zur Erweiterung des Sensormodells auf Basis der, in Kapitel 4 beschriebenen, Versuchsergebnisse erläutert.

Das im späteren Verlauf beschriebene erweiterte Sensormodell baut auf dem bereits existierenden idealen Lidar-Modell des Fachgebiets auf. Das Modell bildet die grundsätzliche Funktionalität eines Lidar-Sensors durch Raycasting ab. Dabei wird eine vorher definierte Anzahl an Strahlen auf die Szene ausgegeben. Wird ein Treffer detektiert, wird der Abstand zwischen diesem und dem Sensor berechnet und zurückgegeben. Die grundlegende Struktur des Raytracing-Programms wird im Folgenden genauer beschrieben, um ein besseres Verständnis des Modells zu bekommen. Das Raytracing-Programm ist als Teil der Simulationsumgebung anzusehen, da das Raytracing in der Simulationsumgebung durchgeführt wird.

Die durchgeführten Ergänzungen für das erweiterte Sensormodell setzen sich dann aus einer Erweiterung des idealen Sensormodells, also des bereits bestehenden Raytracing Programms und einem externen C++ - Programm zusammen. Das Raytracing-Programm wird so angepasst, dass es einen Strahl durch mehrere einzelne Strahlen darstellt, um die Strahlaufweitung mit einzubeziehen. Es führt somit eine Überabtastung durch. Das externe C++ - Programm bekommt die Daten des Raytracing-Programms übergeben und verarbeitet sie weiter. Es baut auf dem OSI auf und rechnet die überabgetastete Punktwolke auf die einzelnen „realen“ Strahlen zurück. Dabei berücksichtigt es beispielsweise die Fähigkeit der Mehrfachdetektion oder das Strahlmuster eines realen Sensors.

Teile des folgenden Kapitels sind an die Beschreibung des einfachen Radar-Modells in der Masterarbeit von Clemens Linnhoff<sup>83</sup> angelehnt.

Zunächst wird nachfolgend auf den grundlegenden Aufbau des OptiX-Frameworks eingegangen, welches die Raytracing Funktionalität bereitstellt. Das eigentliche Raytracing wird in einem separaten, auf der Programmiersprache CUDA basierenden Teil des Frameworks durchgeführt. Im CUDA-Teil ist das bestehende ideale Sensormodell des Fachgebiets implementiert, welches anschließend beschrieben wird. Darauf folgt die Erläuterung der Änderungen am idealen Modell zur Erweiterung des gesamten Modells. Danach wird die Funktionsweise des neu entwickelten externen C++ - Programms beschrieben sowie auf einige weitere Änderungen eingegangen (siehe auch Abb. 5-1).

### 5.1 Grundlegender Aufbau des OptiX-Frameworks

Das Modell ist wie bereits in Abschnitt 3.3.3 beschrieben mit Hilfe des OptiX Frameworks von Nvidia implementiert. Als Programmiersprache dient, neben C++ auch CUDA, welche zur parallelisierten Ausführung nur für das Raytracing selbst verwendet wird. Mit Hilfe des C++-Teils wird das Grundgerüst des Modells implementiert. Es werden hier Operationen durchgeführt, die vor und nach dem Raytracing notwendig sind. Beispielsweise werden Parameter aus Dateien oder der Simulationsumgebung eingelesen. Dazu wird in einer Main-Methode ein Objekt vom Typ `OptiXLidar` implementiert, das die notwendigen Sensorparameter sowie die Funktionen zur Initialisierung des

---

<sup>83</sup> Linnhoff, C.: Entwicklung eines Radar-Sensormodells (2018).

---

Raytracings beinhaltet. Die wichtigsten Funktionen sind `initByXML()` zum Einlesen der Sensorparameter und `createOptiXDrawable()` zum Erstellen eines Objekts der Klasse `OptiXDrawable` zum Verarbeiten der Daten von der CUDA-Seite. Um die Sensorparameter in CUDA zum Auslesen vorzubereiten, werden sie in der Funktion `preTrace()` als Kontextvariable gesetzt. Mit der Funktion `writeToShm()` werden Puffer, in denen Daten vom CUDA-Programm gespeichert sind, mit Hilfe eines Runtime Data Bus in einen Shared Memory geschrieben. Der Vorteil ist, dass dadurch externe Programme mit Hilfe eines Schlüssels auf den Shared Memory zugreifen und so Daten auslesen können.

Als Schnittstelle zum CUDA-Teil dient die Klasse `OptiXLidarInterface()` von der ein Objekt in der Funktion `createOptiXLidarInterface()` erstellt wird. Hier sind Funktionen zur Kommunikation mit CUDA enthalten. Außerdem werden die für das Raytracing essentiellen Funktionen ausgeführt. Die hier beschriebenen Funktionen basieren alle auf den Standardfunktionen aus den Headerdateien `OptiX.h`, `OptiXDrawable.h` und `OptiXInterface.h` der OptiX-Bibliothek.

Der CUDA-Teil besteht aus den CUDA-Dateien `optiXLidarCamera.cu` und `pointCloud.cu` sowie der Headerdatei `Payload.h`. In der Datei `optiXLidarCamera.cu`, welche das CUDA-Hauptprogramm darstellt, werden die Strahlen für das Raytracing konfiguriert und ausgesendet. Durch die Funktion `OptiXLidarInterface::launchRays()` werden mehrere Instanzen dieses Programms auf der C++ Seite gestartet. In der Datei `PointCloud.cu` ist das Hitprogramm enthalten, das die gewünschten Funktionen beim Treffen des Strahls auf ein Objekt beinhaltet.

Aus den Cuda-Dateien erstellt der Compiler sogenannte Parallel Thread Execution bzw. PTX-Dateien, die direkt vom Grafikkartentreiber übersetzt und ausgeführt werden können. Hierdurch wird die parallelisierte Berechnung auf der Grafikkarte ermöglicht.

Im Folgenden Abschnitt wird eine detailliertere Beschreibung der Funktionen im Cuda-Teil durchgeführt.

## 5.2 Ideales Lidar-Sensormodell

Wie bereits erwähnt ist das Raytracing in den zwei CUDA-Dateien des OptiX-Frameworks implementiert und stellt somit das bestehende ideale Lidar-Sensormodell dar, welches im Folgenden beschrieben wird. In der Datei `optiXLidarCamera.cu` sind die Funktionen des sogenannten Kameraprogramms zum Konfigurieren und Aussenden der Strahlen enthalten. In der Datei `PointCloud.cu` sind die Funktionen des Hitprogramms enthalten, um beispielsweise bei einem Treffer die Distanz und die Richtung zum Sensor zu berechnen und zu speichern.

### Kameraprogramm

Das Kameraprogramm enthält insbesondere die Funktion `RT_PROGRAM void optiXLidarCamera`, in der das Raytracing gestartet wird. Die Funktion wird im C++-Teil für jedes Pixel der Bildebene erneut aufgerufen (siehe Abbildung 3-1). In der Variablen `launch_index` sind jeweils der aktuelle x- und y-Index des Pixels in der Bildebene gespeichert. Gleichzeitig entspricht der Index der Zelle

---

im Puffer (`output_buffer` bzw. `osi_buffer`), in dem die Daten zur weiteren Verarbeitung gespeichert werden. In diesen Puffern wird im idealen Modell nur die durch das Hitprogramm gemessene Reichweite gespeichert.

Der Ursprung, von dem ausgehend die Strahlen durch die Bildebene ausgesendet werden, wird in OptiX als Eye bezeichnet. Um einen Strahl auszusenden, wird zuerst die Richtung, in die der Strahl ausgesendet werden soll, in ortsfesten Koordinaten als Vektor definiert. Um diese zu berechnen, wird die Orientierung der Bildebene in diesem Koordinatensystem benötigt, die in den Vektoren `U`, `V` und `W` gespeichert ist. Mit Hilfe der minimalen Winkel und dem Winkelinkrement, jeweils in Elevations- bzw. Azimutrichtung, multipliziert mit dem `Launch-Index` ergeben sich die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  in die gewünschte Richtung. Aus den beiden Winkeln und den drei Richtungsvektoren lässt sich nun die Strahlrichtung `ray_direction` berechnen.

Neben dem Ursprung und der Richtung des Strahls sind zu dessen Erstellung noch weitere Parameter zu übergeben. Hierzu zählt der minimale und maximale Zielabstand (`scene_epsilon` und `max_range`) und eine Typendefinition (`ray_type`). Die Typendefinition wird dazu verwendet, um unterschiedliche Arten von Strahlen zu definieren, wie zum Beispiel Strahlen zu Schatten- oder Lichtberechnung. Dies ist hilfreich, um Hitprogramme beim Treffen auf Objekte nur für bestimmte Strahlentypen auszulösen. Da für das Lidar-Modell jedoch keine Unterscheidung in unterschiedliche Typen notwendig ist, wird nur ein Standardtyp definiert. Die Funktion

```
optix::Ray ray = optix::make_Ray(ray_origin, ray_direction, ...  
ray_type, scene_epsilon, max_range);
```

erzeugt mit Hilfe der zuvor beschriebenen Parameter einen Strahl. Um den erzeugten Strahl abzuschieken wird die Funktion

```
rtTrace(top_object, ray, prd);
```

verwendet. Zur Verwendung der Funktion sind neben dem `Ray` (Strahl) noch ein `top_object` und die Struktur `prd` (payload) nötig. In `top_object` ist der Punkt in der Hierarchie der Szenerepräsentation gespeichert, an welchem das Raytracing startet. Der Parameter wird durch das Programm vorgegeben und lässt sich nicht verändern. Im Payload `prd`, der für jeden Strahl erstellt wird, sind neben Parametern für Entwicklung und Debugging auch die Ergebnisse aus dem Hitprogramm gespeichert. Die im Payload enthaltenen Daten werden vor dem Aussenden initialisiert und im Hitprogramm anschließend mit Daten beschrieben. Die Ergebnisse werden in das Array `prd.result` der Länge vier gespeichert und sind nach Ausführen der Funktion `RT_trace` im Kameraprogramm verfügbar. Anschließend werden sie in die Puffer `output_buffer` und `osi_buffer` zur weiteren Verarbeitung geschrieben.

## Hitprogramm

Mit dem Hitprogramm ist nachfolgend insbesondere die Funktion `RT_PROGRAM void closestHit()` gemeint. Dieses wird aufgerufen, wenn der ausgesendete Strahl das Objekt trifft, das sich am

---

nächsten zum Ursprung (Eye) befindet. Neben diesem Hitprogramm gibt es zwei weitere von OptiX. Eines ist die Funktion `RT_PROGRAM void anyHit()`, das bei jedem Treffer in der Flugbahn des Strahls aufgerufen wird, die nur durch die maximale Entfernung begrenzt wird. Das andere ist das Hitprogramm `RT_PROGRAM void miss()`, welches aufgerufen wird, wenn der Strahl beim Erreichen der maximalen Entfernung keinen Treffer erzielt hat. In der Funktion wird in diesem Fall die maximale Reichweite als Ergebnis in `prd.Result` ausgegeben.

In der Funktion `closestHit()` liegt mit der als Kontextvariable `t_hit` vorliegenden Raytracingparameters `rtIntersectionDistance` bereits der Trefferpunkt vor. Mit Hilfe des Ursprungs und der Richtung des Strahls lässt sich die Distanz zwischen dem Trefferpunkt und dem Ursprung berechnen. Dies geschieht ausgelagert in der Funktion `lidarHit()` und wird anschließend in der Variablen `prd.result` gespeichert und dem Kameraprogramm übergeben.

### 5.3 Erweiterung des Raytracers um die Strahlaufweitung durch Überabtastung

Das ideale Lidar-Sensormodell aus dem vorherigen Abschnitt wird im Folgenden um die Funktionalität der Strahlaufweitung ergänzt. Hierzu werden im ersten Schritt einige Änderungen am Raytracer vorgenommen. Dieser Teil der Erweiterung ist in Bezug auf das, in Abbildung 3-3 dargestellte Gesamtmodell im Bereich „PCL Generierung“ anzusiedeln, da die implementierte Strahlaufweitung Teil des Raytracers und damit Teil der Punktwolkengenerierung ist.

Ein erster Modellentwurf besteht darin, die Strahlaufweitung durch das Optimierungsverfahren von Hook and Jeeves<sup>84</sup> nachzubilden. Dazu soll beim Auftreffen des Strahls auf ein Ziel im Strahlkegel, dessen Größe von der Entfernung abhängig ist, eine Optimierung nach dem Punkt mit der größten Intensität durchgeführt werden. Es soll der Punkt im Strahlkegel gefunden werden, der am stärksten in Richtung des Sensors zurückstrahlt. Da der Ansatz jedoch nicht in der Lage ist, mehrere gut reflektierende Objekte im Strahl zu finden (Mehrzielfähigkeit), sondern nur ein lokales Maximum (bzgl. der Intensität) findet, wird er verworfen.

Eine andere Möglichkeit, die Strahlaufweitung nachzubilden bieten verschiedene Varianten des Überabtastens, wie im Stand der Technik (Abschnitt 3.5) beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine auf Überabtastung basierende Variante zur Abbildung der Strahlaufweitung genutzt. Hierbei wird ein realer, durch die Strahlaufweitung beeinflusster Strahl durch mehrere separate Strahlen abgebildet, wodurch eine erhöhte Auflösung erreicht wird. Das Vorgehen, um das bestehende ideale Sensormodell um diese Fähigkeit zu ergänzen, ist nachfolgend beschrieben. Dabei sind zuerst einige sensorspezifische Parameter zu ergänzen, gefolgt von Änderungen im Kameraprogramm. Anschließend wird das Hitprogramm noch um die Funktionalität der Intensitätsberechnung erweitert, was auf Basis der vom OptiX-Framework bereitgestellten BRDF geschieht.

Ein vollständiger Überblick bezüglich der im Folgenden durchgeführten Anpassungen und Erweiterungen des idealen Sensormodells des FZD ist zur Verdeutlichung in Abbildung 5-1 dargestellt.

---

<sup>84</sup> Linnhoff, C.: Entwicklung eines Radar-Sensormodells (2018), S. 57ff.



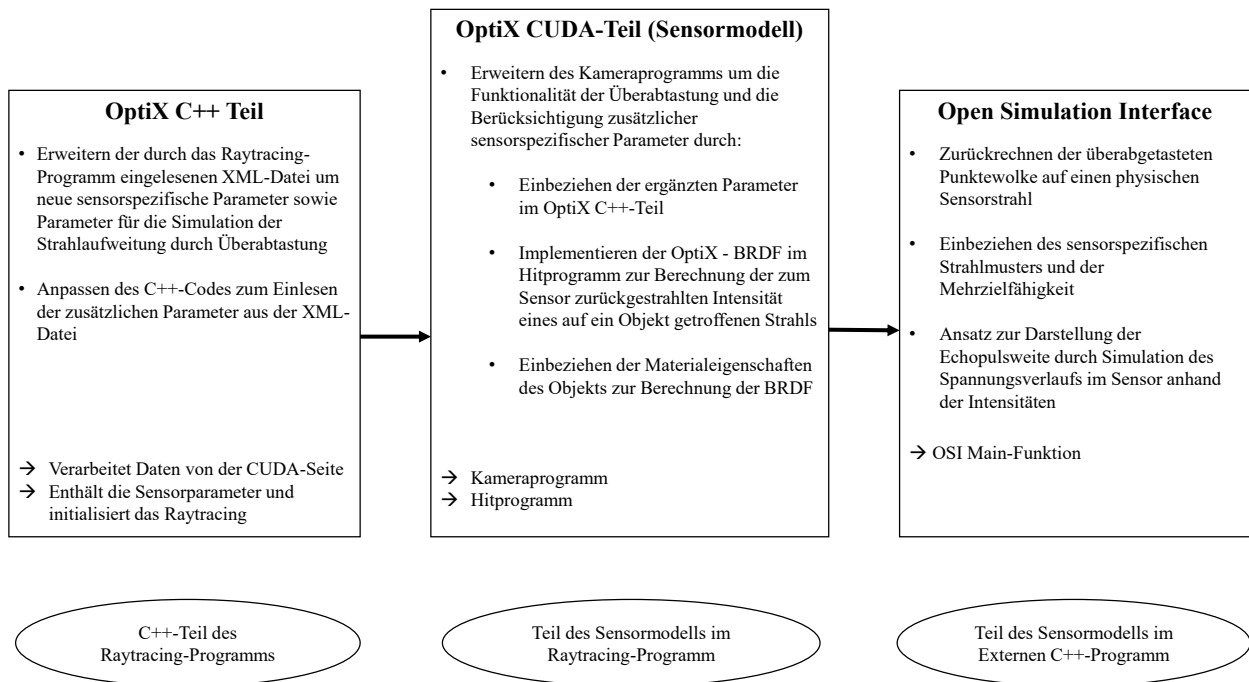


Abbildung 5-1: Struktur der im Folgenden durchgeführten Anpassungen und Erweiterungen am idealen Sensormodell.

Teil des ersten Schritts ist das Hinzufügen neuer sensorspezifischer Parameter. Diese sollen die bereits bestehenden, wie unter anderem die maximale Reichweite, das Field of View (FOV) und die Auflösung, also die Anzahl der Pixel/Rays, ergänzen. Dies ist notwendig, um die Strahlaufweitung und weitere Sensoreigenschaften für das Raytracing mit einzubeziehen. Um eine möglichst hohe Flexibilität für das Raytracing beizubehalten, wird jede Variable in einer XML-Datei gespeichert. Diese wird für die Simulation durch den C++-Teil des Raytracers ausgelesen. Dazu lässt sich die Datei `ProjectIGConfig.xml` erweitern.

Einer der neuen Parameter definiert den Winkel, der zwischen zwei Strahlen liegt, `beam_distance` genannt. Der Winkel ist definiert als die horizontale Winkelauflösung des Sensors minus dem Winkel der Strahlaufweitung. Der nächste Parameter `x_res_y` beschreibt die horizontale und vertikale Auflösung eines einzelnen Strahls in Pixeln. In den Parametern `min_range_max` und `v_angle_min_max` sind gleichzeitig minimale und maximale Reichweite sowie der maximale und minimale vertikale Winkel definiert. Der Parameter `h_diverence_v` beinhaltet die vertikale und die horizontale Strahlaufweitung. Des Weiteren sind in den Parametern `h_angle_min_max_X` (X steht hier für den jeweiligen Layer) der maximale und der minimale für jeden Layer definiert. Letztlich sind noch in den Parametern `layer_distance_X` für jeden Layer der Abstand in Grad zum vorherigen Layer definiert. Die Variable X steht hier für den Index (1-8). In jedem Parameter sind vier Winkel gespeichert. In Tabelle 5-1 sind die ergänzten Parameter zusammengefasst. Neben den Parametern des Raytracers sind auch die im nächsten Abschnitt beschriebenen Parameter des externen C++-Programms aufgelistet.

Wie bereits beschrieben ist der C++-Teil zuständig, die in der XML-Datei definierten Parameter im Raytracer verfügbar zu machen. Hier sind Anpassungen notwendig. In der Klasse

Tabelle 5-1: Auflistung der im erweiterten Sensormodell hinzugefügten Parameter

Parameter Raytracer	Parameter externes Sensormodell
Anzahl Strahlen pro Layer	Parameter zum Einbeziehen der variierenden Ausleuchtung durch die Dioden
Strahldistanz	Parameter für die Geraden zum Einbeziehen des Strahlmusters
Pixelauflösung eines Strahls für die Überabstauung	Schwellwert
Strahlaufweitung	Distanzauflösung für das Diskretisieren
Horizontaler, maximaler und minimaler, Winkel für jeden Layer	Distanzauflösung des Sensors
Distanz zw. jedem Layer	Distanzverluste

`OptiXLidarDrawable` befindlichen Funktion `preTrace()` werden die neuen Parameter ergänzt und wie die bereits vorhandenen auch als Kontextvariablen gesetzt. Anschließend müssen die Parameter noch im Namespace `OptiXLidar` als Variablen definiert und dem entsprechenden Wert zugewiesen werden. Dies geschieht mit Hilfe der Funktion `initByXML` im Namespace `OptiXLidar`. Zum Schluss sind die Variablen im Kameraprogramm mit Hilfe des Befehls `rtDeclareVariable` und dem entsprechendem Datentyp deklariert.

Alle Änderungen am Kameraprogramm und am Hitprogramm, die nötig sind, um die Strahlaufweitung in das Modell zu integrieren, werden im Folgenden beschrieben. Kamera und Hitprogramm werden so angepasst, dass der Raytracer mit Hilfe der neuen übergebenen Parameter jeden Strahl, den der physische Sensor abgibt, in der Größe der Strahlaufweitung überabtestet. Also durch mehrere Strahlen darstellt. Die Anzahl der einzelnen Strahlen, die pro realem Strahl verwendet werden, ist beliebig vorgebar und wird nur durch die Rechenleistung von Prozessor und Grafikkarte limitiert. Um im Folgenden Missverständnisse zu vermeiden, wird der physisch aufgeweitete Strahl des Sensors als „realer Strahl“ bezeichnet und die einzelnen Strahlen des Raytracers für die Überabtestung als Strahl bzw. Strahlen bezeichnet.

## Kameraprogramm

Das Kameraprogramm wird so angepasst, dass es die neu hinzugefügten Parameter aus der XML-Datei verarbeiten kann und die Rays (Strahlen) in die für die Überabtestung vorgesehene Richtung aussendet.

In der Funktion `optiXLidarCamera()` werden zunächst zwei Rechenschritte ergänzt. Mit diesen lässt sich aus dem `launch_Index` und der Pixelauflösung `x_res_y` der Layer und des realen Strahls, der Strahl berechnen, indem sich der Raytracer gerade befindet. Die Ergebnisse sind in den Variablen `beam_nr` und `layer_nr` gespeichert. Somit ist durch diese zwei Parameter jedem einzelnen Strahl ein realer Strahl und dessen Layer zugeordnet. Die Anzahl der Strahlen, die ein Sensor in horizontale Richtung aussendet und die Anzahl der Layer sind sensorspezifische Parameter. Mit Hilfe des Divergenzwinkels und der Pixelauflösung wird diese noch in die entsprechenden Winkel umgerechnet.

---

Anschließend folgt ein Konstrukt aus 16 `If`- bzw. `Else-If`-Anweisungen. Jede `If`-Abfrage steht für einen realen Layer des Sensors, der wie zuvor beschrieben aus dem `launch_Index` berechnet ist. Dies ermöglicht für jeden Strahl eine spezifische Berechnung des aktuellen Elevations- (`beta`) und Azimutwinkels (`alpha`) in Abhängigkeit vom Layer durchzuführen. Daraus wiederum folgt, dass für jeden Layer ein eigener horizontaler Anfangs- und Endwert sowie der vertikale Abstand zwischen den Layern frei gewählt werden kann. Somit wird eine größtmögliche Anpassbarkeit des Raytracers erreicht. Nach der Berechnung der beiden Winkel wird die Funktion

```
prd = trace_ray(alpha,beta,amin,amax);
```

aufgerufen. Neben `alpha` und `beta` werden noch die beiden Parameter `amin` und `amax` übergeben, die den aktuellen vertikalen maximalen und minimalen Winkel in rad abhängig vom Layer beinhalten. `prd` beinhaltet den zurückgegebenen Payload des Hitprogramms und damit die Ergebnisse wie die Distanz zwischen getroffenem Objekt und Sensor. In der Funktion sind, wie auch beim idealen Modell beschrieben, die Strahlrichtung mit Hilfe der Winkel und des Koordinatenursprungs berechnet und die Ergebnisse für den Payload initialisiert. Anschließend wird der Strahl wieder mittels `make_Ray()` und `rt_Trace` ausgesendet.

## Hitprogramm

Das Hitprogramm wird so angepasst, dass es neben der, wie im idealen Sensormodell beschriebenen, Berechnung der Distanz zwischen dem durch den Strahl getroffenen Objekt und dem Ursprung auch die zurückgestrahlte Intensität zum Sensor zurück gibt. Dazu wird auf die im OptiX-Framework bereits enthaltene BRDF-Funktion zurückgegriffen und in das Hitprogramm implementiert.

Die Grundstruktur des Hitprogramms ist die gleiche, wie beim idealen Sensormodell mit den drei separaten Hitprogrammen `miss()`, `anyHit()` und `closestHit()`. In letzterem wird wiederum die ergänzte Funktion `lidarHit()` aufgerufen. Dort wird die Distanz zwischen dem Trefferpunkt und dem Ursprung durch diesen und die Richtung des Strahls berechnet. Neben dieser Berechnung wird auch über die Funktion

```
intensity = getBRDF(DistBack, rayDirectionSensor);
```

die Intensität (`intensity`) des Strahls bestimmt, die neben der Distanz zurückgegeben wird. `DistBack` und `RayDirectionSensor` entsprechen hierbei der Distanz und der Richtung des Strahls. Die Funktion beinhaltet die nötigen Berechnungen und liest die Materialparameter aus, die für die Bestimmung der Intensität durch die BRDF-Funktion bei dem Auftreffen auf ein Objekt erforderlich sind.

Die verwendeten Objekte bzw. Materialparameter sind in der externen XML-Datei „ProjectMaterials.xml“ definiert und werden aus ihr ausgelesen. Jede Definition einer Materialart bzw. Objekte wie z.B. ein Fenster, ein Objekt aus Chrom, ein Auto oder die Straße setzt sich aus dem Namen und unterschiedlichen Parametern wie beispielsweise bestimmten Eigenschaften zusammen. Nach

---

der Definition wird in der XML-Datei durch ein sogenanntes „Material Assignment“ jedes Material einem „Target“ zugewiesen. Targets sind Texturen, die der Oberfläche von Objekten in der Simulationsumgebung zugewiesen sind. Beispiele für solche Texturen sind „Default\_Plastic“ für Plastik-Teile, „Chrome“ für Chrom-Teile oder „CarGlass“ für Fahrzeugscheiben.

Neben dem Auslesen und Berechnen der Materialparameter für die getroffene Textur, insbesondere in der Funktion `getMaterialProperties()`, werden noch einige für die BRDF wichtige Normalenvektoren über die Funktion `getNormalVectors()` berechnet.

Die eigentliche Berechnung der BRDF wird anschließend in der Funktion

```
const float intensity = BRDF(directionToPreviousHit, ...
    rayDirectionSensor, ffTextureNormal, world_shading_binormal, ...
    world_shading_tangent, albedo, NdotL, NdotV, roughness, ...
    metallness, specular).x;
```

durchgeführt. Die übergebenen Variablen sind `directionToPreviousHit`, die der zuvor beschriebenen Variablen `RayDirectionSensor` entspricht, da keine Mehrfachausbreitungen berücksichtigt ist sowie die Variable `RayDirectionSensor` selbst. Es folgen die Variablen `ffTextureNormal`, `world_shading_binormal` und `world_shading_tangent`, die entsprechende Normalenvektoren bzgl. der Auftrefffläche sind. `NdotL` und `NdotV` sind Skalarprodukte aus dem Auftreffwinkel des Strahls auf die Oberfläche. Anschließend folgen noch die Materialparameter `albedo`, `roughness`, `metallness` und `specular`. Die Funktion ist in der OptiX Bibliothek unter `OptiXBase.h` deklariert.

Anschließend werden die sich für eine Rückreflexion vom Trefferpunkt zum Ursprung ergebende Intensität und der Abstand zum Ursprung dem Kameraprogramm durch den Payload `prd` übergeben. Im Kameraprogramm werden die Ergebnisse aus dem Hitprogramm mit weiteren Daten zum ausgesendeten, dem sogenannten OSI-Buffer übergeben, um durch das nachfolgend beschriebene Sensor-Modell weiter verarbeitet zu werden. Der OSI-Buffer dient als Schnittstelle zwischen dem Raytracing-Programm und dem im Open Simulation Interface integrierten externen C++-Programm.

## 5.4 Externes C++-Programm im Open Simulation Interface

Das Sensormodell ist ein externes C++-Programm, das im Framework Open Simulation Interface (OSI) implementiert ist. Im Bezug auf den in Abbildung 3-3 dargestellten Gesamtaufbau des zukünftigen Lidar-Modells am Fachgebiet ist dieser Teil des Modells im Modul „Strahlausrichtung, Strahlaufweitung und Rauschen“ anzusiedeln. Die überabgetastete Punktwolke, die der Raytracer bzw. das Simulationsprogramm generieren, wird über den Puffer „OSI-Buffer“, der auf Googles Protobuff (Protokoll-Puffer) basiert, übertragen. Ziel des Sensormodells ist es, anschließend aus der überabgetasteten Punktwolke eine möglichst realitätsnahe, dem simulierten Sensor entsprechende Punktwolke zu generieren.

Das Modell wird durch die Simulationsumgebung für jedes „Frame“ des Raytracers, also ein einmaliges komplettes scannen der Szene, erneut aufgerufen. Es liest die Daten aus einer OSI-Datenstruktur

---

für Lidar-Sensor-Daten aus, führt dann die nötigen Berechnungen durch und speichert diese in der Struktur wieder ab.

Übergeben bekommt das Sensormodell aufgrund technischer Limitierungen nur die sphärischen Koordinaten jedes Strahls (Elevation, Azimut und Entfernung) sowie die Intensität. Dies führt zu dem Problem, dass die zur Konfiguration des Raytracers aus der externen XML-Datei ausgelesenen Parameter zum aktuellen Stand nicht übertragbar sind. Jedoch sind diese für das Zuordnen der einzelnen Strahlen zu einem „realen“ Strahl fundamental wichtig.

Um das Problem vorübergehend zu lösen, sind alle relevanten Parameter in Variablen in der Header-Datei gespeichert. Bei einem Umkonfigurieren des Raytracers müssen diese entsprechend den Änderungen in der XML-Datei auch angepasst werden. Um die Gefahr einer falschen Konfiguration zu reduzieren, überprüft das Programm bei jedem Aufruf, ob die erwartete Anzahl der übergebenen Punkte mit der des Raytracers übereinstimmt.

Das Ziel für eine spätere Version ist es, die gewünschten Sensorparameter nur in OSI zu hinterlegen und nicht mehr in der Simulationsumgebung. Der Raytracer und die Simulationsumgebung werden dann von OSI entsprechend konfiguriert und aufgerufen und geben die berechneten Daten zum Schluss wieder an OSI zurück. Letzteres wiederum wird schon jetzt für alle weiteren Berechnungen durchgeführt.

### **Vorsortieren der Daten**

Zu Beginn des Programms werden die vier Variablen, die einen Strahl definieren (Azimuth, Elevation, Distanz zwischen Ursprung und Auftreffpunkt und Intensität) aus der zuvor beschriebenen Datenstruktur ausgelesen und für eine bessere Verarbeitung in jeweils einem Array gespeichert. Anschließend wird für jeden Strahl die entsprechende Strahl-Nummer (`beam_nr`) und Layer-Nummer (`layer_nr`) errechnet, da diese nicht von der Simulationsumgebung zu OSI übertragen werden können. Das geschieht mit Hilfe der auch für den Raytracer zuvor ergänzten Parameter, wie die Auflösung des Raytracers und die Auflösung eines realen Strahls. Dies ist aufgrund der Tatsache, dass jedes „Frame“ die gleiche Reihenfolge an Pixeln bzw. Strahlen besitzt, möglich. Sie sind immer von links nach rechts und von oben nach unten sortiert.

Sind Layer-Nummer und Strahl-Nummer berechnet, können die vier Variablen, die einen Strahl definieren jeweils in ein neues, dreidimensionales Array geschrieben werden. Dieses ist nach Strahl-Nummer, Layer-Nummer und Index im realen Strahl sortiert. Die Indizes der einzelnen Strahlen für den realen Strahl sind auch von links nach rechts und von oben nach unten sortiert. Aufgrund der hohen Anzahl an Datenpunkten durch das Überabtasten ist es nicht möglich, die Daten in ein einzelnes vierdimensionales Array zu schreiben. Auch muss der Speicher dynamisch adressiert werden, um die hohe Anzahl an Daten speichern zu können.

## Einfügen des Strahlmusters

Im nächsten Schritt wird für jeden realen Strahl das für den simulierten Sensor spezifische Strahlmuster mit einbezogen. Die folgende Beschreibung des Vorgangs basiert auf dem Strahlmuster des Ibeo Lux 2010. Durch anpassen der Parameter kann das Strahlmuster jedoch beliebig verändert werden. Dazu wird mit Hilfe einer `For`-Schleife jeder Index eines realen Strahls durchlaufen und für jeden Strahl ein horizontaler und ein vertikaler Index berechnet. Somit ergibt sich bei einem realen Strahl mit der Auflösung von 16x100 Pixel für jeden einzelnen Strahl ein horizontaler Index zwischen 1 und 16 und ein vertikaler Index zwischen 1 und 100. Ist dies geschehen, lässt sich nach Belieben jede Spalte und jede Zeile der Matrix bzgl. der Intensität anpassen. In Abbildung 5-2 (a) ist das durch die 3-fach-Diode erzeugte Strahlmuster, wie in Kapitel 4 beschrieben, schematisch dargestellt. So wird beispielsweise die Intensität des 1., 6., 11. und 16. Strahls auf 0 gesetzt. Die Intensitäten des 2., 5., 7., 10., 12., 15. Strahls um 50% reduziert und die der restlichen Strahlen bleibt unangetastet. Anschließend wird das durch die Optik des Sensors erzeugte „verblassen“ der Intensität am oberen und unteren Ende des realen Strahls mit Hilfe von zwei Geradengleichungen eingefügt. Dabei werden, wie in Abbildung 5-2 (b) angedeutet, die entsprechenden Strahlen, die über bzw. unter der Geraden liegen in der Intensität um 50% reduziert. Als Vergleich ist das reale Strahlmuster des Ibeo-Sensors in der Abbildung dargestellt.

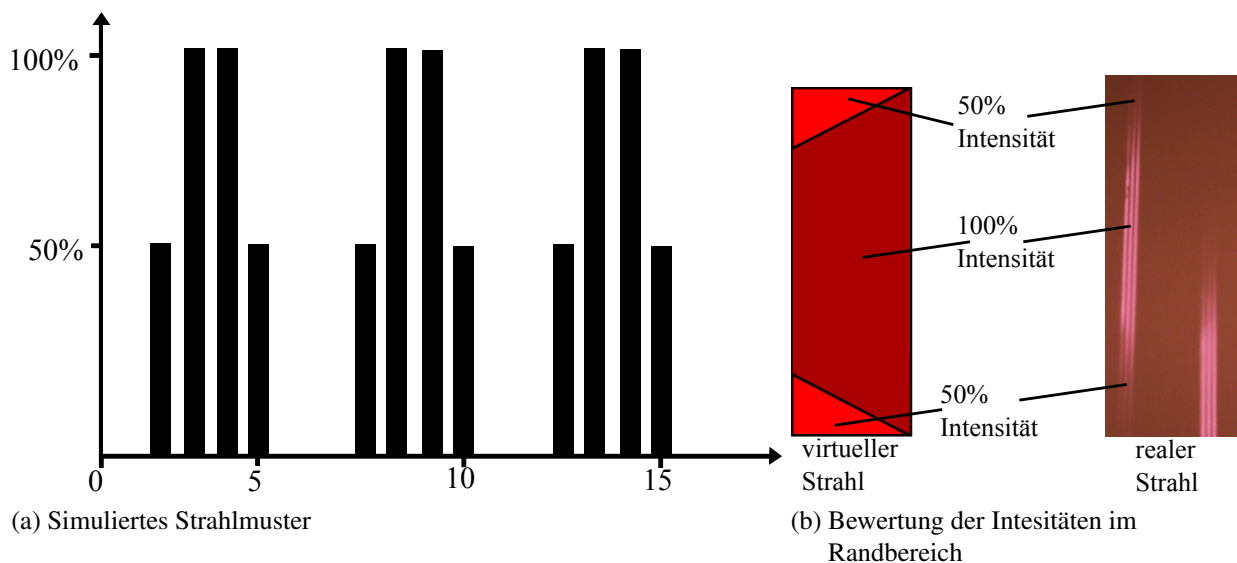


Abbildung 5-2: Darstellung des simulierten Strahlmusters des Ibeo Lux 2010 mit den unterschiedlich bewerteten Intensitäten der Strahlen aus der Überabtastung.

## Erzeugen der Echopulsweite und finales Sortieren nach der Distanz

Nachdem das Strahlmuster einbezogen ist, fehlt noch das Berücksichtigen der Mehrzielfähigkeit und das Simulieren der Echopulsweite. Des Weiteren muss beurteilt werden, welcher Strahl in die Gesamtberechnung der Intensität mit einbezogen werden soll und welcher nicht. Wichtig ist dies, da Strahlen, die beispielsweise auf Asphalt treffen, aufgrund der schlechten Reflexionseigenschaften von einem

echten Lidar-Sensor im Normalfall nicht detektiert werden können. Um die gewünschten Aspekte zu erreichen, soll für jeden realen Strahl der Spannungsverlauf, der im Detektor durch das einfallende Licht erzeugt wird, nachempfunden werden. Dies entspricht einer „echten“ Rohdaten-Simulation.

Zuerst werden hierzu alle Strahlen bzw. Punkte, die sich in einem realen Strahl befinden, mit Hilfe des Sortier-Algorithmus `std::sort()` aus der C++-Standard-Bibliothek nach ihrer Distanz sortiert. Das Ergebnis des Sortier-Algorithmus ist im oberen Teil von Abbildung 5-3 schematisch dargestellt. Abgebildet sind verschiedene Intensitäten eines beispielhaften realen Strahls für detektierte Objekte mit einem Abstand zwischen 0m und 20m. Je nach Größe der Strahlaufweitung und der Objekte, die sich im realen Strahl befinden, gibt es Distanzabschnitte ohne Intensitäten und Distanzen mit vielen Intensitäten.

Um den zuvor beschriebenen Spannungsverlauf nachzuempfinden, werden die Distanzen diskretisiert, also in bestimmten Abschnitten aufgeteilt. Die Intensitäten in diesen Distanzabschnitten (engl. Range Bins) werden aufsummiert. Die Distanzauflösung des Ibeo Lux 2010 beträgt laut Hersteller 4 cm. Um einen genauer aufgelösten simulierten Spannungsverlauf zu erhalten, wird der Distanzabschnitt um den Faktor 8 auf 5 mm reduziert. In Abbildung 5-3 sind im unteren Teil die aufsummierten Intensitäten über die diskretisierten Distanzen schematisch als Ergebnis für den oberhalb dargestellten Verlauf abgebildet.

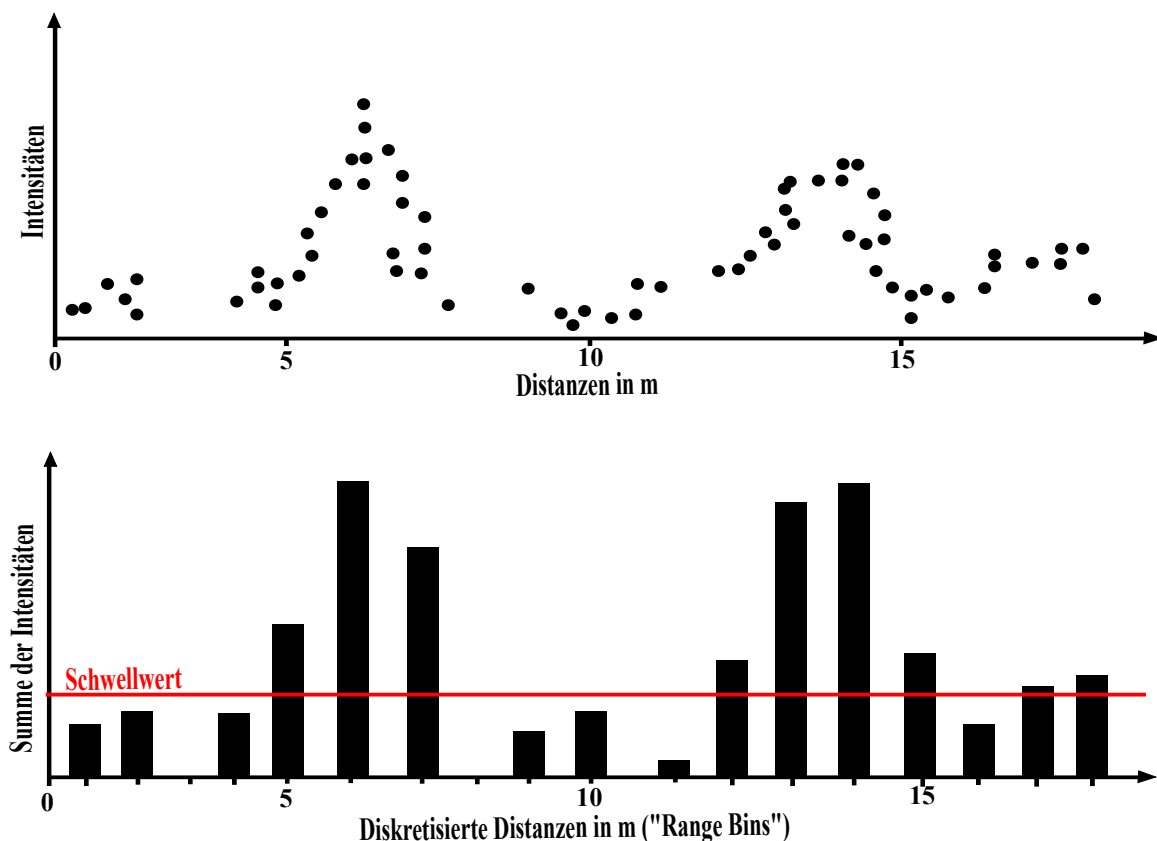


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Bildung von Range Bins und des Schwellwertes.

---

Die Range-Bins besitzen in dieser Abbildung für eine bessere Darstellbarkeit eine Größe von 1 m. Somit ergibt sich für jeden Range-Bin, abhängig von der Größe und der Anzahl der sich darin befindlichen Intensitäten, eine unterschiedlich große Gesamtintensität. Wie in der Abbildung 5-3 dargestellt, entstehen für mehrere nebeneinander liegende Range-Bins höhere Ausschläge und für andere geringe bis keine. Die großen ggf. nebeneinander liegenden Ausschläge entsprechen dann mit hoher Wahrscheinlichkeit einem gut reflektierendem Objekt.

Anschließend wird entschieden, welcher der Ausschläge als relevant zu bewerten ist und welcher verworfen wird. Dies geschieht mit Hilfe eines Schwellwerts. Der Schwellwert ist so zu wählen, dass alle Intensitäten bzw. Range-Bins berücksichtigt werden, die der reale Sensor auch detektieren würde. Zu ersten Untersuchungszwecken wird der Schwellwert nach Erfahrungswerten gewählt, so dass alle Reflexionen durch z.B. eine Straße verworfen werden. Wie in Abbildung 5-3 dargestellt führt der dort eingezeichnete Schwellwert zu einer Detektion von zwei reflektierenden Objekten in einer Distanz von 6 m und 14 m und zur Detektion eines weniger reflektierenden Objekts, in einer Entfernung von 18 m.

Der Algorithmus geht dabei so vor, dass er die nach Distanz sortierten und diskretisierten Intensitätswerte, beginnend vom kleinsten Abstand, durchläuft und die Intensitätswerte, die über dem Schwellwert liegen, in ein separates Array schreibt. Das Array dient als Ergebnisspeicher für die Intensitäten des aktuell bearbeiteten realen Strahls. Dabei wird gleichzeitig die simulierte Echopulsweite berechnet. Diese wird für jeden hintereinander liegenden Range-Bin um die entsprechende Länge des Bins erhöht. Als Ergebnis für die Distanz wird der mittlere Distanzwert des Range-Bins genommen, mit dem höchsten Intensitätswert in dem Ausschlag. Dies ist für den Ausschlag von 5 m bis 7 m in Abbildung 5-3 der Distanzwert 6 da er die höchste Intensität besitzt.

Die Echopulsweite würde sich hier zu 3 m ergeben, da 3 Ausschläge hintereinander über dem Schwellwert liegen und die Range-Bins jeweils 1 m groß sind. Die Intensität berechnet sich aus der Summe der drei Intensitäten aus den drei Range-Bins. Dieses Vorgehen ist damit begründet, dass ein in der Distanz ausgedehnter aber gut reflektierender Körper nicht schlechter bewertet wird als ein zum Strahl hin exakt eben ausgerichteter Körper. Für Elevation und Azimut werden zur finalen Ausgabe die Winkel des Mittelpunkts vom realen Strahl verwendet. Berücksichtigt werden, wie beim Ibeo Lux 2010 vom Hersteller beschrieben, maximal vier Echos, alle weiteren werden verworfen. Der Algorithmus verwendet dabei die ersten vier Echos, unabhängig von ihrer Stärke. Reale Strahlen, die keine Range-Bin über dem Schwellwert besitzen, werden verworfen und gelten damit als nicht detektiert.

Allerdings müssen auch mögliche Mehrfachdetektionen von Objekten die der reale Sensor nicht auflösen kann, vermieden werden. Daher werden Range-Bins, die im Bereich von maximal 4 cm, der Distanzauflösung des Ibeo-Sensors, unter den Schwellwert fallen, immer noch zum kompletten Puls gezählt. Dies ist für den Bereich von 12 m bis 18 m beispielhaft in Abbildung 5-3 dargestellt. Hier fällt der Range-Bin bei 16 m unter den Schwellwert, trotzdem zählen die nächsten beiden Bins noch zum vorherigen Puls.



---

## 5.5 Weitere Ergänzungen am Modell

Neben den zuvor beschriebenen Erweiterungen am Sensormodell, insbesondere in Bezug auf die Strahlaufweitung und das Strahlmuster, werden noch zwei weitere Anpassungen vorgenommen, welche im Folgenden beschrieben werden.

Das Sensormodell berücksichtigt zu Beginn der Arbeit die Verluste bei der Signalstärke nicht, die durch das kugelförmige Ausbreiten eines Lichtstrahls bei steigender Entfernung zum Sensor auftreten. Wie in den Grundlagen beschrieben (siehe Abschnitt 2.3.3), sind die Distanzverluste näherungsweise umgekehrt proportional zu  $R^4$ , wobei  $R$  die Distanz zwischen Sensor und Objekt ist. Diese Näherung wird in das Sensormodell implementiert, indem jede summierte Intensität, die einem jeweiligen diskretisierten Distanzwert (Range-Bin) zugeordnet ist, mit dem Faktor  $1/R^4$  multipliziert wird. Für die Distanz  $R$  wird der dem diskretisierten Abstandswert zugeordnete mittlere Distanzwert verwendet. Somit ist die Distanzabhängigkeit der Intensität näherungsweise einbezogen.

Zum anderen unterliegt das durch den Lidar-Sensor empfangene Signal einem Messrauschen, was unter Umständen die Detektion bzw. die Nichtdetektion beeinflussen kann. Dies bezieht sich insbesondere auf den in Kapitel 5.4 beschriebenen Schwellwert zur Entscheidung, ob ein Objekt detektiert wird oder nicht, bzw. ob ein Objekt als eigenständig oder als Teil eines Objekts angesehen wird. Das Rauschen wird als weißes Rauschen angesehen, also als zufällig. Um dieses Rauschen nachzubilden, wird für jeden summierten Intensitätswert eines diskretisierten Abstandes ein Zufallswert addiert bzw. subtrahiert. Dieser Zufallswert ist als erste Näherung um  $1/10$  des aktuellen Intensitätswertes kleiner angenommen. Eine genaue Parametrisierung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt und sollte noch ergänzt werden.

## 5.6 Verifizierung des Modells und Zusammenfassung

Das in diesem Kapitel implementierte Modell soll die sich aus den Versuchen in Kapitel 4 ergebenen und in Abschnitt 4.9 zusammengefassten Ergebnisse in das bestehende ideale Modell implementieren und damit erweitern. Dazu ist der Raytracer um die Strahlaufweitung, welche implementiert werden sollte, durch Überabtastung erweitert. Zusätzlich ist der Raytracer so konfigurierbar gemacht, dass möglichst viele der verschiedenen Sensorparameter wie die Abstände zwischen Strahlen und Layern berücksichtigt werden können.

Das neu in OSI implementierte externe Sensormodell fügt die Strahlen aus der Überabtastung des Raytracers zusammen und berücksichtigt dabei das Strahlmuster des Ibeo Lux 2010 Sensors in Bezug auf die Umrisse eines Strahls sowie in Bezug auf die nicht gleiche Ausleuchtung durch die gestapelten Infrarotdioden. Des Weiteren ist ein erster Ansatz zur Simulation der Echopulsweite auf Basis von Intensitäten, die sich aus den diskretisierten Entfernungsabschnitten ergeben, implementiert. Die in Versuch 6 nachgewiesene Fähigkeit der Mehrfachdetektion innerhalb eines realen Strahls ist ebenfalls implementiert.

---

Wie sich die implementierten Anpassungen am Sensormodell auf die Annäherung an einen realen Sensor auswirken, ist zu überprüfen. Im folgenden Kapitel folgt ein erster Versuch, die Änderungen des Modells bewerten zu können.

---

## 6 Validierung des Sensormodells

---

Das zunächst bestehende ideale Sensormodell bei FZD ist, wie in Kapitel 5 beschrieben, um einige physikalische Eigenschaften ergänzt. So sind unter anderem die Strahlaufweitung, das spezifische Strahlmuster und weitere sensorspezifische Parameter ergänzt.

Um einen ersten Eindruck von der Wirksamkeit der, in Kapitel 5 beschriebenen, Implementierungen zu bekommen, wird mit Hilfe eines Testszenarios die durch das erweiterte Sensormodell generierte Punktwolke bewertet. Dafür wird das von Sebastian Huch<sup>85</sup> in seiner Masterarbeit entwickelte Testszenario mit den von ihm gewählten Metriken zur Bewertung herangezogen.<sup>86</sup> Mit dem gewählten Testszenario ist in erster Linie eine Beurteilung der Auswirkungen der implementierten Strahlaufweitung im Vergleich zum anfänglich bestehendem idealen Modell möglich.

Für eine vollständige Validierung des Modells müssten neue Testszenarien und ggf. auch Metriken entwickelt werden, die auf die Strahlaufweitung und die anderen implementierten Effekte ausgelegt sind.

Im Folgenden wird zuerst das Testszenario und die angewendeten Metriken zur Bewertung der Lidar-Sensormodelle erläutert. Danach folgt die Auswertung der Ergebnisse mit einem Vergleich des idealen und des erweiterten Sensormodells, gefolgt von einer Diskussion der Ergebnisse.

### 6.1 Beschreibung des Testszenarios

Das Testszenario besteht zum einen aus realen Messfahrten und einer möglichst realitätsnahen Abbildung dieser in der Simulationsumgebung. Es wird die Auffahrt auf ein Stauende in fünf statischen Distanzschritten simulieren. Dazu wird das Ego-Fahrzeug (Ego), an dem die Lidar-Sensoren montiert sind, hinter zwei in Fahrtrichtung nach vorne ausgerichtete Pkws platziert. Bei den beiden vorderen Fahrzeugen handelt es sich um einen VW-Crafter (linkes Fahrzeug) und einem BMW i3 (rechtes Fahrzeug). Der Aufbau des Szenarios ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

Während des Testszenarios wird das Ego-Fahrzeug an fünf verschiedenen longitudinalen Distanzen  $\Delta x$  zu den beiden davor befindlichen Fahrzeugen platziert und jeweils eine unabhängige Messung durchgeführt. Die unabhängigen Messungen führen zu voneinander abweichenden lateralen Distanzen  $\Delta y$  und den beiden Orientierungswinkeln  $\Delta \psi$  zwischen dem Ego-Fahrzeug und den davor befindlichen Fahrzeugen. Die beiden Fahrzeuge stehen während jeder Messung auf der gleichen Position. Das linke Fahrzeug hat eine laterale Distanz von 4,22 m zum rechten, in Bezug auf die Referenzpunkte und die Hinterachsen. Die verschiedenen sich ergebenden Werte für  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  und  $\Delta \psi$  sind in Tabelle 6-1 aufgelistet.

Die Ground Truth Position für das Ego-Fahrzeug und das rechte Fahrzeug wird mit Hilfe des RTK 634 GPS Systems bestimmt. Es besitzt eine Genauigkeit von 0,1 m für die Position und 1° für den Azimuth. Alle anderen Positionen sind mit Hilfe eines Maßbandes doppelt vermessen.

---

<sup>85</sup> Huch, S.: Entwicklung einer umfassenden Metrik für die Bewertung einer Lidar-Sensor-Simulation (2018).

<sup>86</sup> Rosenberger, P. et al.: Benchmarking and Functional Decomposition of Automotive Lidar Sensor Models (2019).

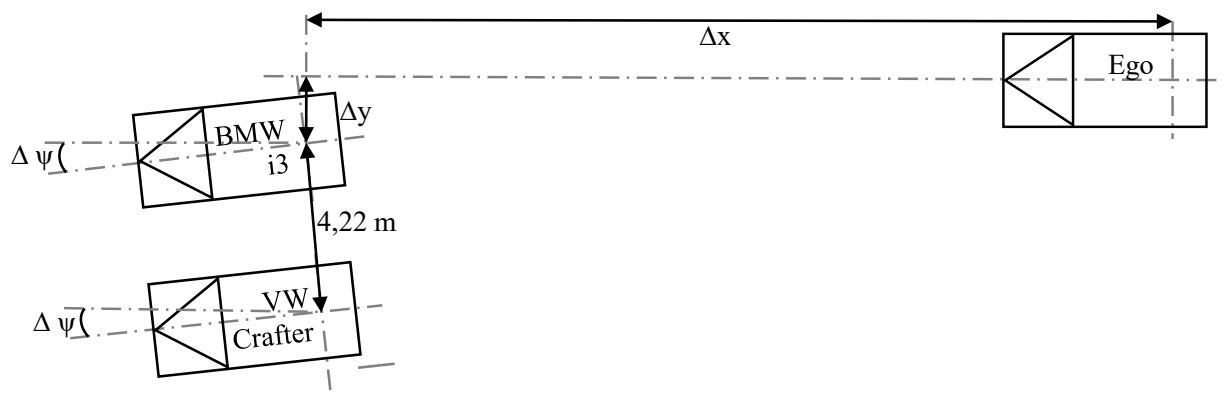


Abbildung 6-1: Skizze des Versuchsaufbaus mit den drei verwendeten Fahrzeugen.<sup>87</sup>

Tabelle 6-1: Parameter für das Szenario

Szenario Nr.	$\Delta x$ /[m]	$\Delta y$ /[m]	$\Delta \psi$ /[°]
1	50,06	0,35	0,1
2	39,95	0,45	1,3
3	29,97	0,10	0,8
4	19,99	0,16	1,1
5	9,97	0,17	1,3

Das Ego-Fahrzeug ist mit zwei Ibeo LUX 2010 Lidar-Sensoren ausgestattet. Die Position und die Orientierung der beiden Sensoren im Fahrzeug sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Alle Koordinaten beziehen sich dabei auf einen Punkt im Fahrzeug der entsprechend der ISO8855:2011 definiert ist. Dieser befindet sich auf dem Boden unter dem Zentrum der Hinterachse (Referenzpunkt).

Tabelle 6-2: Einbauposition der Ibeo Lux 2010 Sensoren

Ibeo Nr.	$\Delta x$ /[m]	$\Delta y$ /[m]	$\Delta z$ /[m]	$\Delta \psi$ /[°]
1	3,47	0,63	0,36	17,9
2	3,49	0,58	0,36	-17,9

## 6.2 Metriken zur Bewertung von Lidar-Sensormodellen

Die im Folgenden beschriebenen Metriken helfen, die Punktwolken aus den realen Sensordaten mit denen der Simulation zu vergleichen und zu bewerten. Es gibt verschiedenste Metriken, um Punktwolken miteinander zu vergleichen, unter anderem auch beschrieben von Huch.<sup>88</sup> Sie lassen sich in zwei Kategorien einordnen.

<sup>87</sup> Basierend auf Rosenberger, P. et al.: Benchmarking and Functional Decomposition of Automotive Lidar Sensor Models (2019), S634, Abb 4.

<sup>88</sup> Huch, S.: Entwicklung einer umfassenden Metrik für die Bewertung einer Lidar-Sensor-Simulation (2018).

Die Metriken der ersten Kategorie lassen sich direkt auf die zwei Punktwolken anwenden ohne vorherige Anpassungen. Ein Beispiel für diese Metriken ist die sogenannte Punktwolke-Distanz-Metrik (engl. pointcloud distance metric) nach Browning et al.<sup>89</sup>. Sie basiert auf der Berechnung der minimalen euklidischen Distanz von jedem Punkt in der realen Punktwolke  $\mathbb{P} = \{p_1, \dots, p_M\}$  zu jedem Punkt in der simulierten Punktwolke  $\tilde{\mathbb{P}} = \{\tilde{p}_1, \dots, \tilde{p}_N\}$  mit den dreidimensionalen Punkten  $p_m, \tilde{p}_n \in \mathbb{R}^n$ . Die minimale euklidische Distanz für zwei Punktwolken ergibt sich damit zu

$$D'_{PP}(\mathbb{P}, \tilde{\mathbb{P}}) = \sum_m \min_n ||p_m - \tilde{p}_n||. \quad (6-1)$$

Da es sich um eine unsymmetrische Metrik handelt, wird der ungünstigste Fall angenommen mit

$$D_{PP}(\mathbb{P}, \tilde{\mathbb{P}}) = \max(D'_{PP}(\mathbb{P}, \tilde{\mathbb{P}}), D'_{PP}(\tilde{\mathbb{P}}, \mathbb{P})). \quad (6-2)$$

Für einen Vergleich zwischen realer und idealer Punktwolke wird die Metrik entweder durch die maximale Anzahl an Punkten der realen Wolke oder der simulierten Wolke geteilt. Damit ergibt sich für die Distanz

$$\bar{D}_{PP}(\mathbb{P}, \tilde{\mathbb{P}}) = \frac{D_{PP}(\mathbb{P}, \tilde{\mathbb{P}})}{\max(|\mathbb{P}|, |\tilde{\mathbb{P}}|)}. \quad (6-3)$$

Auch die Auswirkungen von Rauschen werden mit einbezogen. Dazu wird die Metrik für K aufeinanderfolgende Scans angewendet und der Mittelwert  $\bar{D}_{PP}^K(\mathbb{P}, \tilde{\mathbb{P}})$  berechnet. Der so berechnete  $\bar{D}_{PP}^K(\mathbb{P}, \tilde{\mathbb{P}})$ -Wert liegt in einem Bereich zwischen 0 und 1. Liegt der Wert bei 0, ist das Ergebnis als ideal zu bewerten. Liegt der Wert bei 1, ist das Ergebnis als schlecht zu bewerten.

Die zweite Kategorie von Metriken verwendet zweidimensionale Freiraumschätzalgorithmen zur Erstellung von Belegungsgittern (engl. ocupancy-grid). Ein Freiraumschätzalgorithmus bildet die Belegung der Umgebung in Rasterzellen ab und gibt eine Wahrscheinlichkeit der Belegung dieser Zellen an. Um mehrere Belegungsraaster miteinander zu vergleichen, gibt es in der Literatur verschiedene Metriken.

Beispiele hierfür sind die Berechnung des Gesamtfehlers (engl. overall error), des Baron Kreuzkorrelationskoeffizient (engl. Barons cross correlation coefficient) oder der OCR (engl. occupied cell ratio), die in Schaermann et al.<sup>90</sup> beschrieben sind. Der OCR wird zur Bewertung im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Er basiert auf dem zellweisen Vergleich zwischen dem simulierten und dem realen Belegungsgitter. Der OCR beschreibt das Verhältnis der als korrekt bewerteten und belegten Zel-

<sup>89</sup> Browning, B. et al.: 3D Mapping for high-fidelity unmanned ground vehicle lidar simulation (2012).

<sup>90</sup> Schaermann, A. et al.: Validation of vehicle environment sensor models (2017).

len im simulierten Belegungsgitter  $\tilde{\mathbb{G}} = \tilde{c}_1, \dots, \tilde{c}_J$  zur gesamten Anzahl an belegten Zellen im realen Belegungsgitter  $\mathbb{G} = c_1, \dots, c_I$ .<sup>91</sup> Der OCR ergibt sich zu

$$OCR^K = \frac{\sum \zeta(\tilde{c}_j)}{\sum \zeta(c_i)} \quad (6-4)$$

mit

$$\begin{aligned} \zeta(\tilde{c}_j) &= \begin{cases} 1 & \text{wenn } P(\tilde{p}_n \text{ in } \tilde{c}_j) > 0,5 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \\ \zeta(c_i) &= \begin{cases} 1 & \text{wenn } P(p_m \text{ in } c_i) > 0,5 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \end{aligned} \quad (6-5)$$

Für die Berechnung des  $OCR^K$  werden  $K$  unabhängige Scans zur Generierung der realen und der simulierten Belegungsgitter verwendet. Da die Belegungsgitter über die Zeit gemittelt sind, wird auch hier das Rauschen mit berücksichtigt. Somit lässt sich aus  $P(p_m \text{ in } c_i)$  schließen, wie oft eine Zelle innerhalb von  $K$  Scans besetzt ist.

Der berechnete  $OCR^K$  liegt in einem Bereich zwischen 0 und 1. Ein Ergebnis von 1 entspricht dem Idealwert und ein Ergebnis von 0 dem schlechtesten Fall.

### 6.3 Auswertung der Simulation anhand der Metriken

Zur Bewertung des erweiterten und implementierten Sensormodells wird das in Abschnitt 6.1 beschriebene, Szenario mit dem in der Simulationsumgebung enthaltenen Szenario-Editor und den gegebenen Distanzen und Winkel für alle fünf Abstände nachgebildet. Die verwendete modellierte Umgebungskarte für die Simulation bildet den realen Standort, an dem die Messungen durchgeführt werden, möglichst genau ab. Das Höhenprofil und die Vegetation sind jedoch nur teilweise berücksichtigt und entsprechen nicht der realen Umgebung. Anschließend folgt die Simulation des Szenarios mit dem erweiterten Sensormodell, jeweils für die fünf Distanzen. Die Simulation basiert auf dem in Abschnitt 5.4 beschriebenen Stand des erweiterten Sensormodells. Die in Abschnitt 5.5 dargestellten Erweiterungen bzgl. Rauschverhalten und Entfernungsdämpfung sind nicht berücksichtigt.

Zum Erstellen der Simulationsdaten (Punktwolken) im für die Auswertung nötigen Format sind noch Ergänzungen notwendig, diese sind im Folgenden beschrieben. Im OSI, in welchem das erweiterte Sensormodell implementiert ist, gibt es noch keine Möglichkeit zur Ausgabe der berechneten Punktwolke des erweiterten Sensormodells in eine Datei. Daher erfolgt die Ausgabe für die erste Auswertung durch die Funktion `std::ofstream` der C++-Standardbibliothek in eine CSV-Datei (engl. character-separated values). Die simulierten Daten werden nacheinander für jedes, durch das Modell berechnete Frame (dt. Bild, ein vollständiges Scannen der Umgebung durch den Raytracer bzw. Sensor) abgespeichert. Enthalten sind in der Datei die wichtigsten Daten, die zur weiteren Auswertung

<sup>91</sup> Grewe, R. et al.: Evaluation method and results for the accuracy of an automotive occupancy grid (2012).

---

notwendig sind. Dazu zählen insbesondere Elevation, Azimut, Distanz sowie Layer und Nummer des Echos. Das Modell kann aufgrund der beschränkten Datenrate des OSI-Buffers (vgl. Abschnitt 5.4) noch nicht mehrere Sensoren gleichzeitig verarbeiten, daher wird die Simulation für jeden der zwei Sensoren einzeln durchgeführt.

Das Sensormodell bekommt die Frame-Nummer aufgrund der beschränkten Anzahl der übertragbaren Variablen (vgl. Abschnitt 5.4) vom Raytracer nicht übergeben. Diese werden nachträglich hinzugefügt. Um das gewünschte Format der Punktwolke für die Auswertung durch die Metriken zu erhalten, wird zur Weiterverarbeitung der Punktwolke ein für diesen Zweck entwickeltes Programm in der Mathematiksoftware, Matlab verwendet. Dazu erfolgt zuerst ein Einlesen der für die jeweilige Distanzmessung entsprechenden, zwei CSV-Dateien der beiden Sensoren durch das Skript. Anschließend konvertiert dieses zuerst die sphärischen Koordinaten in kartesische und fügt die Frame-Nummer und die Sensor-Nummer (linker oder rechter Sensor) hinzu. Anschließend werden die Punktwolken der zwei Sensoren Frame für Frame zusammengefügt und in einer Datenstruktur abgespeichert. Diese entspricht nun dem für die Auswertung mit den Metriken notwendigen Format der Punktwolken.

Im Folgenden ist das weitere Vorgehen bei der Auswertung der simulierten Punktwolken des erweiterten und idealen Modells, die sich nun im gewünschten Format befinden, anhand der Metriken beschrieben. Daran schließt sich die Auswertung der Ergebnisse an.

### **Simulation auf Basis des implementierten Modells**

Verwendet wird für die erste Simulation das, wie in Abschnitt 5.4 beschriebene, erweiterte Sensormodell. Die Simulation führt eine erste Bewertung der Strahlaufweitung durch. Anpassungen wie die Mehrzielfähigkeit oder die Echopulsweite sind nicht berücksichtigt. Die Bewertung der Punktwolken anhand der Metriken erfolgt in einem zweiten in Matlab erstellten Programm. Zur Auswertung werden die Punktwolken (10m bis 50m) des in dieser Arbeit entwickelten Modells sowie die der realen Sensoren und des idealen Sensormodells in Matlab eingelesen. Zuerst folgen durch dieses Programm einige kleinere Anpassungen der Punktwolken, wie das Auswählen eines einzelnen Frames für die simulierten Punktwolken. Dies geschieht aufgrund des fehlenden Rauschens in den simulierten Daten. Um die Auswirkung des Rauschens in den realen Daten zu reduzieren, erfolgt ein Mitteln der Punktwolken aus 250 Frames der realen Daten. Auch werden aus den Punktwolken alle Echos entfernt, ausgenommen das erste Echo, da das ideale Modell nur dieses ausgibt. Da die Simulation die reale Umwelt während des Szenarios nicht genau genug abbildet, werden alle Punkte, die sich nicht in der Nähe der zwei Fahrzeuge befinden, aus allen Daten entfernt. Anschließend werden die zwei in Abschnitt 6.2 beschriebenen Metriken auf jeweils die Punktwolken des idealen Modells und des realen Sensors sowie auf die Punktwolken des erweiterten Modells und des realen Sensors angewendet.

Als Parameter für die Simulation der Strahlaufweitung sind vom Hersteller (Ibeo) entsprechende Angaben für das erweiterte Modell verwendet worden. Diese entsprechen einer Strahlaufweitung von  $0,08^\circ \times 0,8^\circ$ , einem Strahlabstand von  $0,42^\circ$  bei einer horizontalen Auflösung von  $0,5^\circ$  und einem

vertikalen Abstand von  $0^\circ$  zwischen den Strahlen. Dies führt je nach Layer zu 200 bzw. 190 Strahlen bei dem entsprechenden Sichtbereich des Layers (vgl. Abschnitt 4.1.1). Das ideale Sensormodell ist, wie das erweiterte Sensormodell, parametrisiert, soweit dies anhand der Parameter möglich ist. Als horizontale Winkelauflösung wird daher ein Winkel von  $0,5^\circ$  gewählt.

Zuerst erfolgt die Auswertung einer Simulation auf flacher Ebene in einer entsprechend flachen Gegend in der virtuellen Umgebung. In Abbildung 6-2 (a) ist die Metrik  $D_{pp}$  für das ideale Sensormodell (M1) und für das in dieser Arbeit entwickelte Sensormodell (M2) über die fünf Distanzen dargestellt. Je kleiner der  $D_{pp}$  bzw. die euklidische Distanz, desto besser das Ergebnis. Für die nahen Distanzen von 10 m bis 30 m zeigt sich zum Teil ein leicht besseres und zum Teil ein etwas schlechteres Ergebnis für das erweiterte Modell (M2) im Vergleich zum idealen Modell (M1). Die Genauigkeit sinkt jedoch für beide Modelle bei steigender Distanz. Bei den beiden weiter entfernten Distanzen von 40 m und 50 m ist ein stärkerer Anstieg des  $D_{pp}$  für M1 zu erkennen. Für M2 fällt die Verschlechterung geringer aus.

Das Ergebnis fällt insbesondere bei steigenden Distanzen, die zu einer Vergrößerung der Strahlaufweitung führen, für das erweiterte Modell, mit Berücksichtigung der Strahlaufweitung, besser aus.

In Abbildung 6-2 (b) ist die Metrik OCR für eine Zellgröße von 10 cm dargestellt. Es gilt je größer der OCR-Wert desto besser das Ergebnis. Hier entspricht M1 dem idealen Modell und M2 dem erweiterten Modell. Grundsätzlich ist der OCR-Wert für die Zellgröße von 10 cm bei beiden Modellen schlecht. Für den Bereich von 10 m bis 40 m ergibt sich ein etwas anderes Bild als bei der  $D_{pp}$ -Metrik. Das erweiterte Modell liefert nur ähnliche bis hinzu schlechteren Ergebnissen als das ideale Modell. Für die Distanz von 50 m fällt der Wert jedoch für beide Modelle auf fast 0 ab, was dem schlechtesten Wert entspricht.

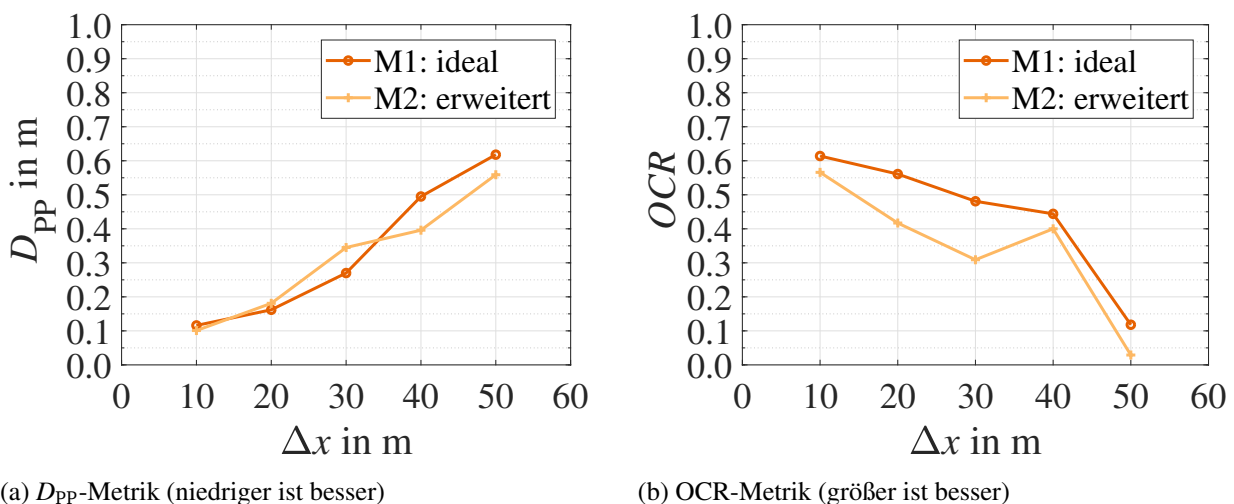


Abbildung 6-2: Dargestellt sind die  $D_{pp}$ -Metrik und die OCR-Metrik über die fünf Distanzen ohne Berücksichtigung des Höhenprofils durch die Simulationsumgebung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in Bezug auf die OCR-Metrik das erweiterte Modell mit Strahlaufweitung tendenziell für etwas schlechtere Ergebnisse sorgt. Die Abwertung bei der Distanz von 50 m für beide Modelle ist auf die Zellgröße von 10 cm und den Abstand zurückzuführen. Hier



haben kleinste Abweichungen wie Höhenunterschiede, Messfehler bei der Abstandsberechnung oder beim Erstellen des Szenarios zu einem Einfluss auf das Ergebnis. Daher ist es Zufall, ob der Punkt in der entsprechenden Zelle liegt oder nicht. Dies führt je nach Situation zu einer Abwertung oder zu einer Aufwertung des Ergebnisses.

Zum Vergleich wird die Simulation auf dem Punkt in der virtuellen Umgebung wiederholt, der dem des realen Szenarios entspricht. Dieser befindet sich an einer leicht abschüssigen Straße. Damit wird das Höhenprofil zumindest teilweise berücksichtigt. Die Umgebungskarte besitzt nur ein ungenau aufgelöstes Höhenprofil für Distanzschnitte von 10 m. In Abbildung 6-3 ist der Verlauf der  $D_{pp}$ -Metrik und der OCR-Metrik des idealen (M1) und des erweiterten Modells (M2) dargestellt.

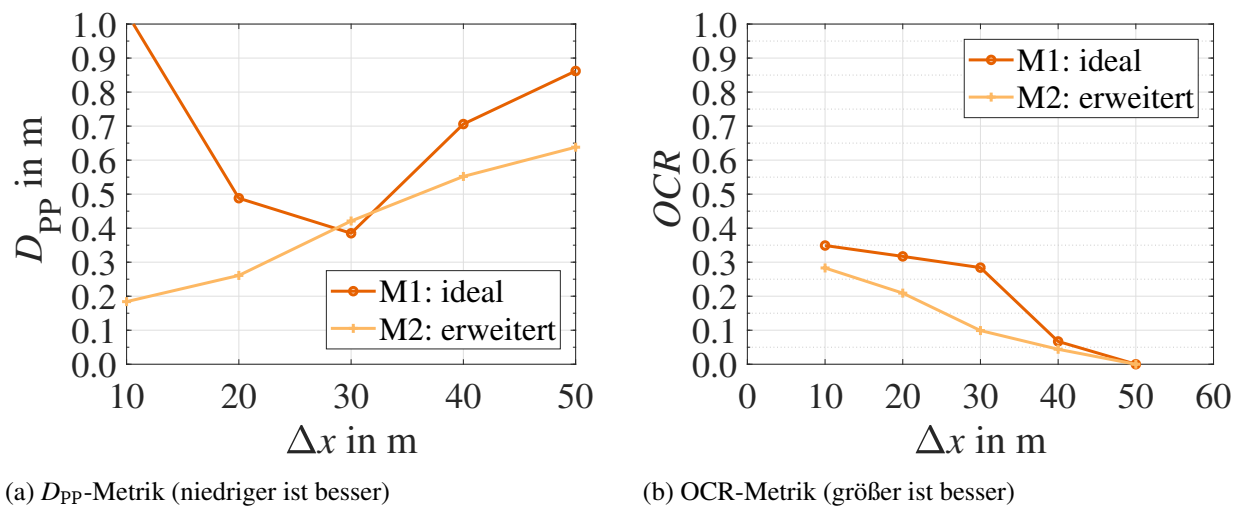


Abbildung 6-3: Dargestellt sind die  $D_{pp}$ -Metrik und die OCR-Metrik über die fünf Distanzen bei Berücksichtigung des Höhenprofils durch die Simulationsumgebung

Im Gegensatz zur Erwartung, dass dies zu einem besseren Ergebnis führt, fällt es nun für beide Sensoren schlechter aus. Der  $D_{pp}$  verschlechtert sich im Vergleich zur Simulation auf der flachen Umgebung für das erweiterte Modell nur leicht. Für das ideale Modell ist die Verschlechterung größer. Durch das Einbeziehen des Höhenprofils sind die Auswirkungen der Strahlaufweitung größer. Der Ausreißer für das ideale Modell (M1) bei 10m ist auf Störungen durch Bodenreflexionen zurückzuführen und ist nicht zu berücksichtigen. Der OCR fällt für beide Modelle im Vergleich zur Simulation ohne Berücksichtigung des Höhenprofils bei allen Distanzen noch weiter ab. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass noch weniger Punkte in der korrekten Zelle des Grids liegen.

Das verwendete Höhenprofil hat dementsprechend einen negativen Einfluss auf die Ergebnisse. Die Position der Pkws und der Sensoren werden in Bezug auf die realen Daten stärker ins Negative verändert als durch die Verwendung einer geraden Ebene.

## 6.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse, die sich aus dem Testszenario und den angewendeten Metriken ergeben, lassen einen gemischten ersten Eindruck zurück. Das erweiterte Sensormodell schneidet im Vergleich zum idealen

---

Sensormodell, insbesondere im Nahbereich (bis 30 m) nur ähnlich oder schlechter ab. Bei größeren Entfernungen ergibt sich ein etwas besseres Ergebnis für das erweiterte Sensormodell. Dies zeigt insbesondere die  $D_{pp}$ -Metrik, in der sich im Vergleich zum idealen Modell eine niedrigere euklidische Distanz der Punkte für größere Entfernungen (ab 40 m) ergibt. Ein Grund warum das erweiterte Sensormodell nicht besser abschneidet ist, dass bei der Berechnung die  $D_{pp}$ -Metrik durch die Anzahl der gesamten detektierten Punkte des realen Sensors geteilt wird. Die Anzahl der detektierten Punkte beim realen Sensor ist höher als beim idealen Modell, welche wiederum eine höhere Anzahl an Punkten als das erweiterte Modell besitzt. Das ist darauf zurückzuführen, dass das Einbeziehen der verschiedenen Effekte und Eigenschaften tendenziell zu einem Rückgang der Anzahl der detektierten Punkte führt.

Da die Metrik die Punktpaare (simulierter und realer Punkt) nicht dem jeweiligen Strahl zuordnet, sondern nur den am nächsten befindlichen Punkt zur Berechnung der euklidischen Distanz verwendet, führt eine größere Anzahl an detektierten Punkten zu einem besseren Ergebnis. Daher sind die Ergebnisse für das ideale Sensormodell im Fall der  $D_{pp}$ -Metrik ähnlich zu denen des erweiterten Modells.

Für das erweiterte Sensormodell zeigen die Ergebnisse der OCR-Metrik mit steigender Entfernung/-Distanz eine leichte Annäherung an die Ergebnisse des idealen Modells in beiden Simulationen (mit und ohne Höhenprofil). Sie bleiben jedoch schlechter als die Ergebnisse des idealen Modells. Bei der Berechnung der OCR-Metrik wird die Anzahl der belegten Zellen des Belegungsgitters des simulierten Modells durch die Anzahl der belegten Zellen des Belegungsgitters des realen Sensors geteilt. Da die Metrik in allen Fällen (vgl. Abbildung 6-3 (b) und Abbildung 6-2 (b)) kleiner eins ist, detektiert der reale Sensor mehr Punkte als die beiden Sensormodelle. Da das ideale Modell mehr Punkte detektiert als das erweiterte Modell, besteht eine größere Wahrscheinlichkeit, eine Zelle zu belegen, was wiederum zu einem besseren Abschneiden des idealen Modells führt. Insgesamt führt dies unter anderem zu den generell schlechten Ergebnissen beider Modelle in Bezug auf die OCR-Metrik. Weitere Gründe wie Fehler im Auswerteskript lassen sich jedoch nicht ganz ausschließen.

Ein weiterer Grund für das tendenziell schlechtere Abschneiden der beiden Modelle insbesondere bei den höheren Distanzen ab 20 m ergibt sich bei der Betrachtung der jeweiligen Punktwolke des Modells und dem Vergleich zu der realen Punktwolke. Schon bei 10 m fällt auf, dass der unterste Layer des Sensors bei den simulierten Modellen hauptsächlich die Reifen der Fahrzeuge detektiert und nicht wie im Fall der realen Punktwolke ein Teil der Karosserie. Bei einer Entfernung von 20 m sind in der Simulation nur noch Teile des 3. Layers des Sensors enthalten, der 4. Layer trifft bereits vollständig den Boden. Ab einer Entfernung von 30 m sind größtenteils nur noch die beiden oberen Layer zu sehen. Die beiden unteren Layer treffen bereits nur noch den Asphalt. In der realen Punktwolke sind hingegen bis 40 m alle vier Layer für beide Fahrzeuge enthalten, bei 50 m fehlt beim rechten Fahrzeug, dem BMW I3 der oberste Layer. Im Anhang in Abschnitt A.4 sind in Abbildung A-7 (a) die ideale und in Abbildung A-7 (b) die durch das erweiterte Sensormodell erzeugte Punktwolke für eine Distanz von 40 m dargestellt.

Diese hohen Abweichungen zwischen den realen und den simulierten Punktwolken sind auf das Hö-

---

henprofil zurückzuführen. Hier hilft auch das Einbeziehen der Strahlaufweitung wenig, wenn sich das Fahrzeug wie in diesem Szenario an Positionen befindet, an denen der jeweilige Strahl des Layers den Boden vollständig abtastet und nicht mehr das Auto im Sichtbereich hat. Je nach Unterschied bzgl. der Stärke des Gefälles bzw. der Steigung zwischen Realität und Simulationsumgebung wird die Position der Punktwolke deutlich beeinflusst. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass das Höhenprofil einen, je nach Situation, größeren Einfluss auf die Genauigkeit der Simulation haben kann als die Strahlaufweitung.

Es lässt abschließend sagen, dass im Rahmen dieser Arbeit, je nach Situation, der Einfluss der berücksichtigten Strahlaufweitung im erweiterten Sensormodell im Vergleich zum idealen Modell positiv ist. Dies ist insbesondere in Bezug auf größere Distanzen und bei größeren Höhenunterschieden der Fall. Wie in der Einleitung bereits beschrieben, eignet sich das verwendete Testszenario nur bedingt zur Bewertung der implementierten Funktionen und dient nur als erster Schritt der Validierung. Dies liegt zum einen an der maximalen Reichweite von 50m, obwohl die Strahlaufweitung mit steigender Distanz immer relevanter wird, zum anderen an den beschriebenen Fehlern des Höhenprofils. Auch ist das Szenario nicht dafür entwickelt, die implementierten Erweiterungen, wie das Strahlmuster und die Echopulsweite zu bewerten und Rückschlüsse auf mögliche Anpassungen zur Verbesserung zu geben. Trotzdem ist es hilfreich, um noch bestehende Fehler sowie auch die Vorteile des erweiterten Sensormodells aufzuzeigen.

---

## 7 Fazit und Ausblick

---

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das auf dem Raytracing Verfahren basierende ideale Lidar-Sensormodell des Fachgebiets Fahrzeugtechnik an der TU Darmstadt um physikalische und technische Effekte erweitert. Um einen Überblick über das Themengebiet zu bekommen und einzuschätzen, welche Effekte einen hohen Einfluss auf die Genauigkeit eines Sensormodells haben, oder welche Effekte noch nicht genau erforscht sind, wurde zunächst ein Überblick zum Stand der Technik gegeben. Ein allgemeines Verfahren zur Modellbildung, das Raytracing sowie die BRDF zur Berechnung der zum Sensor zurückgestrahlten Intensität wurden beschrieben. Wichtige Effekte auf die Lidar-Modellbildung wurden herausgearbeitet. Diese sind die Strahlaufweitung, das Strahlmuster und weitere sensorspezifische Parameter.

Aus dem Stand der Technik wurden anschließend Versuche abgeleitet, um die am Fachgebiet zu Verfügung stehenden Sensoren auf die genannten Effekte zu untersuchen, genauere Kenntnisse der Funktionsweise der Sensoren zu erlangen und die Herstellerangaben zu prüfen. Der Fokus der Versuche lag insbesondere auf der optischen Analyse des Strahlmusters und der Strahlaufweitung der verschiedenen Sensoren. Als Ergebnis der Versuche lässt sich festhalten, dass je nach Sensor ganz unterschiedliche Effekte eine größere Rolle spielen.

So verhielten sich die zur Verfügung stehenden Sensoren von Velodyne für die betrachteten Effekte anders als die von Ibeo. Bei den Sensoren von Velodyne (VLP 32, VLP 16) zeigt sich, dass die Strahlaufweitung im Nahbereich von, bis zu 20m noch einen geringen Einfluss hat, da die Strahlen stark gebündelt sind. Die Strahlaufweitung entspricht bzgl. der Ausdehnung weitestgehend den Angaben des Herstellers. Die zeitliche Strahlaufweitung hat hier geringe Einflüsse. Allerdings darf sie auch im Nahbereich nicht komplett vernachlässigt werden, da sie für bestimmte Situationen relevant werden kann. Weiterhin haben die Versuche bewiesen, dass die Sensoren eine gewisse Mehrzielfähigkeit besitzen, dass Objekte, die kleiner sind als der Strahl selbst, den Sensor beeinflussen können. Das Strahlmuster der beiden Velodyne Sensoren, das durch die Optik des Sensors und den Aufbau der Laser-Diode beeinflusst wird, ist für die Modellbildung größtenteils vernachlässigbar. Der Grund hierfür ist, dass die Strahlen weitestgehend konstant ausgeleuchtet und rechteckig geformt sind. Allerdings sollte die Bauart der Sensoren stärker berücksichtigt werden, da beispielsweise aufgrund des Motorreglers die Strahlen in jedem Scanvorgang in einen anderen Punkt treffen und zwischen zwei Strahlen ein Bereich besteht, der nicht ausgeleuchtet ist. Auch besteht eine Verschiebung beim VLP 32 bzgl. der Winkel je nach Strahl.

Für die von Ibeo entwickelten Sensoren, dem Lux 2010 und Scala, ergeben sich andere Ergebnisse. Hier spielt die Strahlaufweitung schon bei niedrigeren Distanzen eine große Rolle. Die Sensoren besitzen eine gute Mehrzielfähigkeit und können robust mehrere Objekte in einem Strahl unterscheiden. Auch das Strahlmuster spielt im Vergleich zu den getesteten Velodyne Sensoren eine größere Rolle. Es entspricht nicht ganz den Angaben des Herstellers. Die gemessenen Werte fallen horizontal leicht größer aus. Dies liegt vermutlich an der Optik der Sensoren und der zeitlichen Strahlaufweitung. Die vertikalen gemessenen Werte weichen von den Herstellerangaben noch weiter ab, da die Strahlen län-

---

ger sind als angegeben. Des Weiteren besitzt der Strahl mehr die Form eines Trapezes als die eines Rechtecks und die durch die gestapelten Dioden entstehenden Variationen bei der Ausleuchtung in einem Strahl sind in den Versuchen zu identifizieren.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde das ideale Sensormodell erweitert. Zum einen wurde der Raytracer um die Strahlaufweitung auf Basis von Überabtastung erweitert, zum anderen wurde ein externes Sensormodell erstellt. In diesem Modell wurden die Effekte wie das Strahlmuster, die Berechnung der Echopulsweite, die Mehrzielfähigkeit und das Verarbeiten der Überabtastung implementiert.

Der Fokus lag dabei auf dem untersuchten Ibeo Sensor, da hier die priorisierten Effekte eine größere Auswirkung haben. Dennoch ist das Modell so entwickelt worden, dass es durch wenige Anpassungen auch einen anderen Sensor simulieren kann. Der Raytracer als Teil des Modells wurde so ausgelegt, dass er aktuell bis zu 32 einzeln konfigurierbare Layer unterstützt.

Für eine erste Validierung des erweiterten Sensormodells wurde dieses auf ein spezielles Testszenario angewendet. Der Fokus lag auf der Betrachtung der Strahlaufweitung. Das Szenario wurde in der Simulationsumgebung nachgebaut und dann das erweiterte Modell und das ideale Modell simuliert. Als ein erstes Ergebnis lässt sich festhalten, dass das erweiterte Modell mit der Strahlaufweitung insbesondere bei größeren Distanzen zwischen Sensor und Objekt und bei Höhenunterschieden bzgl. der Straße bessere Ergebnisse liefert als das ideale Modell. Dies ist an der  $D_{pp}$ -Metrik zu erkennen. Dennoch zeigt dieser Vergleich zwischen idealem und erweitertem Modell nicht die gewünschten Ergebnisse. Insbesondere die OCR-Metrik, welche die Belegungsrastrer zwischen realem Sensor und Modell vergleicht, zeigt für das ideale Modell bessere Werte als für das erweiterte. Dies ist zum einen auf das nicht ausreichend berücksichtigte Höhenprofil sowie die OCR-Metrik zurückzuführen. Diese bewertet das ideale Modell besser, da es mehr Punkte erkennt als das erweiterte Modell.

Allerdings ist diese erste Validierung für ein abschließendes Fazit nicht ausreichend. Es werden andere implementierte Effekte wie das Strahlmuster, die Echopulsweite und die Mehrzielfähigkeit nicht betrachtet und müssen in weiteren Versuchen validiert werden. Auch muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass bei einer Simulation nicht nur die Genauigkeit des Sensormodells einen Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation hat, sondern auch die Simulationsumgebung selbst. Ist beispielsweise bei einem Vergleich der Punktwolken (real und simuliert) in einem möglichst realitätsnahen Testszenario die Modellierung der Umgebung, insbesondere die des Höhenprofils, nicht hinreichend genau, wird auch ein gut modellierter Sensor schlecht abschneiden.

Als abschließendes Fazit lässt sich sagen, dass durch diese Arbeit ein Lidar-Sensormodell entwickelt wurde, das eine wesentlich tiefergreifende Parametrisierbarkeit erlaubt als das ideale Sensormodell. Auch berücksichtigt es nun mehrere physikalische Effekte wie die Strahlaufweitung, das Strahlmuster und näherungsweise die Dämpfung durch die Entfernung und das Rückstrahlverhalten des Laserstrahls durch die BRDF-Funktionen. Es wurde ein erster Ansatz zur Simulation des Spannungsverlaufs zur Berechnung der Echopulsweite gemacht. Inwieweit die implementierten Effekte und die erhöhte Parametrisierbarkeit die Annäherung des Modells an verschiedene reale Sensoren verbessern, müssen zukünftige Arbeiten zeigen.

---

## Ausblick

Es zeigt sich, dass im Hinblick auf die weitere Validierung des erweiterten Sensormodells vor allem das Höhenprofil des Testszenarios in der Simulationsumgebung berücksichtigt werden muss. Es können entweder Versuche auf flachem Gelände durchgeführt werden oder das Höhenprofil auf dem getesteten Gelände muss wesentlich genauer aufgelöst sein. Um sicherzustellen, dass das verwendete Höhenprofil korrekt ist, lassen sich beispielsweise die realen Höhendaten aufzeichnen und mit denen aus der Simulation vergleichen. Wichtig ist auch, dass der Elevationswinkel des realen und des simulierten Sensors übereinstimmen.

Für eine weitere Validierung des Sensormodells sind zusätzliche Versuche mit den Sensoren anzustreben. Beispielsweise kann das Verhalten der Echopulsweite genauer untersucht werden, um die Annahme zu überprüfen, dass die Echopulsweite stärker durch die räumliche Ausdehnung des reflektierenden Objekts beeinflussbar ist als durch dessen Größe. Hierzu wird ein Objekt, das den Strahl des Sensors komplett ausfüllt und gut reflektiert, zuerst möglichst waagrecht in den Strahl gehalten. Anschließend wird dies mit demselben Objekt auf der gleichen Position bei einer Schräglage von beispielsweise  $45^\circ$  in die Tiefe wiederholt. Theoretisch führt dies, durch die Erhöhung der Tiefenausdehnung der reflektierenden Fläche, zu einer steigenden Echopulsweite. Zumindest für eine gleichbleibende, da die insgesamt beleuchtete Fläche geringer wird. Dies ist eine Möglichkeit, um den durch das erweiterte Modell simulierten Spannungsverlauf genauer zu parametrisieren und mit der Intensität zu vergleichen.

Ein weiterer Versuch ist für die Überprüfung der Annahme denkbar, dass bei einem Lidar-Sensor Mehrwegausbreitung eine vernachlässigbare Rolle spielt. Dazu wird beispielsweise ein Spiegel, der den Strahl des Sensors auf ein weiteres gut reflektierendes Objekt oder einen weiteren Spiegel leitet, genutzt werden. So wird der Strahl zurück in Richtung des Sensors reflektiert.

Für weitere Validierungen kann die bei FZD vorhandene Drehbühne genutzt werden. Ein Fahrzeug kann auf die Bühne gestellt und dann beliebig gedreht und vom Sensor abgetastet werden. Durch eine weitere Aufnahme der Bühne ohne ein Fahrzeug können aus der ersten Aufnahme Reflexionen aus der Umgebung entfernt werden. Das Szenario lässt sich dann in der Simulationsumgebung nachbilden. So ist ein Vergleich des simulierten und realen Sensors ohne Einflüsse durch die Umgebung zu erwarten.

Auch Versuche zum Rauschverhalten und zur Dämpfung des Signals durch steigende Distanzen sind denkbar, um die implementierten Näherungen zu parametrisieren und zu validieren. Wie bereits erwähnt, sind auch entsprechende Versuche zur detaillierten Prüfung der implementierten Effekte, wie das Strahlmuster und die Echopulsweite, zu entwickeln.

Neben einer detaillierten Validierung des Modells sind auch Erweiterungen und Verbesserungen des erweiterten Sensormodells möglich. Ein Aspekt ist hier die Erweiterung des Raytracers um eine Mehrzielfähigkeit. Diese betrifft das Erkennen durchdringbarer Objekte wie einer Glasscheibe oder von Regentropfen. Diese Fähigkeit der Sensoren wurde in dieser Arbeit durch Versuche bewiesen.

Das Sensormodell und der Raytracer sind, wie bereits beschrieben, grundsätzlich für mehrere Sensortypen anwendbar. Für eine vielfältigere und anwenderfreundlichere Anpassung des Sensormodells

---

sind einige Optimierungen und Verbesserungen denkbar.

Ein weiterer Punkt sind Anpassungen am Open Simulation Interface und der Simulationsumgebung. Die Übertragbarkeit einer größeren Datenmenge sowie auch von mehreren Punktwolken, falls mehrere Sensoren eingesetzt werden, sollte ermöglicht werden. Ziel ist es, das Simulationsprogramm später durch das Open Simulation Interface zu steuern und zu konfigurieren.

Ein andere Aspekt ist das Berücksichtigen mehrerer Materialien und Materialeigenschaften in der Simulationsumgebung. So kann die Intensität durch die BRDF exakter berechnet werden.

Neben diesen Punkten sind weitere Umwelteinflüsse, wie beispielsweise Wetterbedingungen oder die Sonneneinstrahlung, zu überprüfen. Sinnvoll ist ebenfalls eine detaillierte Simulation des Empfangszweigs.

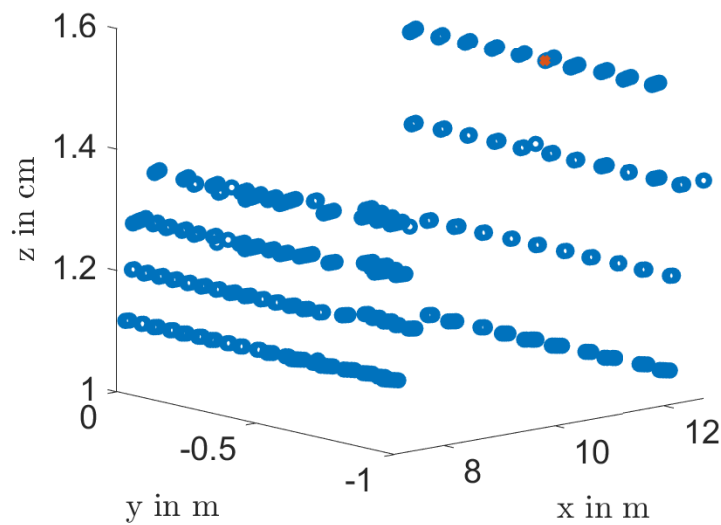
---

## A Anhang

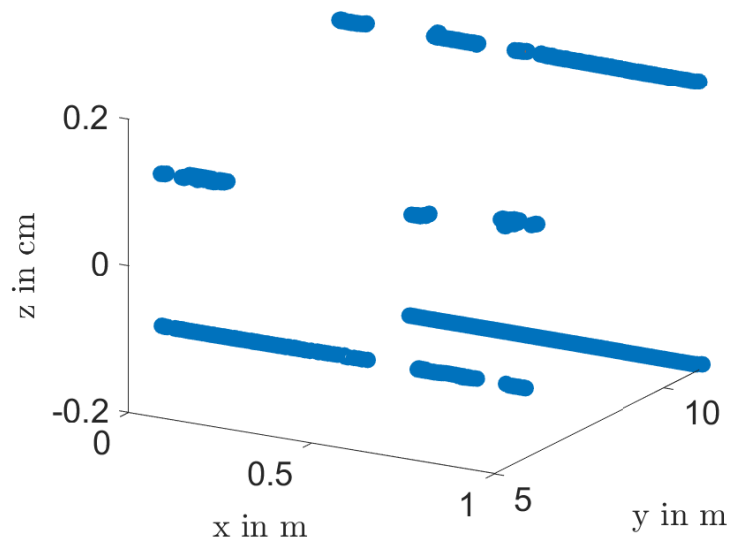
---

### A.1 Punktwolken Versuch 5

In Abbildung A-1 sind die sich ergebenden Punktwolken für den Ibeo Lux 2010 und den Velodyne VLP-16 für Versuch 5 abgebildet. Die Punktwolken beziehen sich auf die Aufnahmen mit der Pkw-Scheibe. Aus Abbildung A-1 (a) lässt sich für den Ibeo Lux 2010 Lux 4 eine gute Erkennungsrate für die Pkw-Scheibe ableiten. Der Velodyne VLP-16 hat wie aus Abbildung A-1 (b) folgt, Probleme bei der vollständigen Erkennung der Pkw-Scheibe.



(a) Ibeo Lux 2010 - Pkw-Scheibe



(b) Velodyne VLP-16 - Pkw-Scheibe

Abbildung A-1: Dargestellt sind die sich ergebenden Punktwolken des Ibeo Lux 2010 und des Velodyne VLP-16 für Versuch 5.



---

## A.2 Vergleich der Strahlmuster bei zwei Ibeo Lux 2010 Sensoren

In der folgenden Abbildung A-2 (a) und (b) ist das Strahlmuster für zwei baugleiche Ibeo Lux 2010 Lux 4 Sensoren dargestellt. Die Aufnahmen erfolgten unter gleichen Bedingungen. Aus dem Vergleich der Bilder zeigt sich ein Unterschied zwischen dem Strahlmustern der Sensoren. Im mittleren Bereich laufen die beiden oberen und die beiden unteren Layer für einen Sensor (Abb.A-2 (b)) vertikal ineinander, für den anderen nicht (Abb.A-2 (a)) .



(a) IbeoLux 2010 Lux 4 - Modell 1



(b) IbeoLux 2010 Lux 4 - Modell 2

Abbildung A-2: Dargestellt ist das Strahlmuster zweier Ibeo Lux 2010 Lux4 unter den gleichen Bedingungen.

---

### A.3 Infrarot Aufnahmen bei 11 m

Im folgenden Abschnitt sind die Infrarotaufnahmen bei einer Distanz von 11 m dargestellt. Enthalten sind Bilder der Ibeo Lux 2010 Lux 1, des Ibeo Lux 2010 Lux 4, des Velodyne VLP-16 und des Velodyne VLP-32. Die Belichtungszeit beträgt bei allen Aufnahmen 8 s.

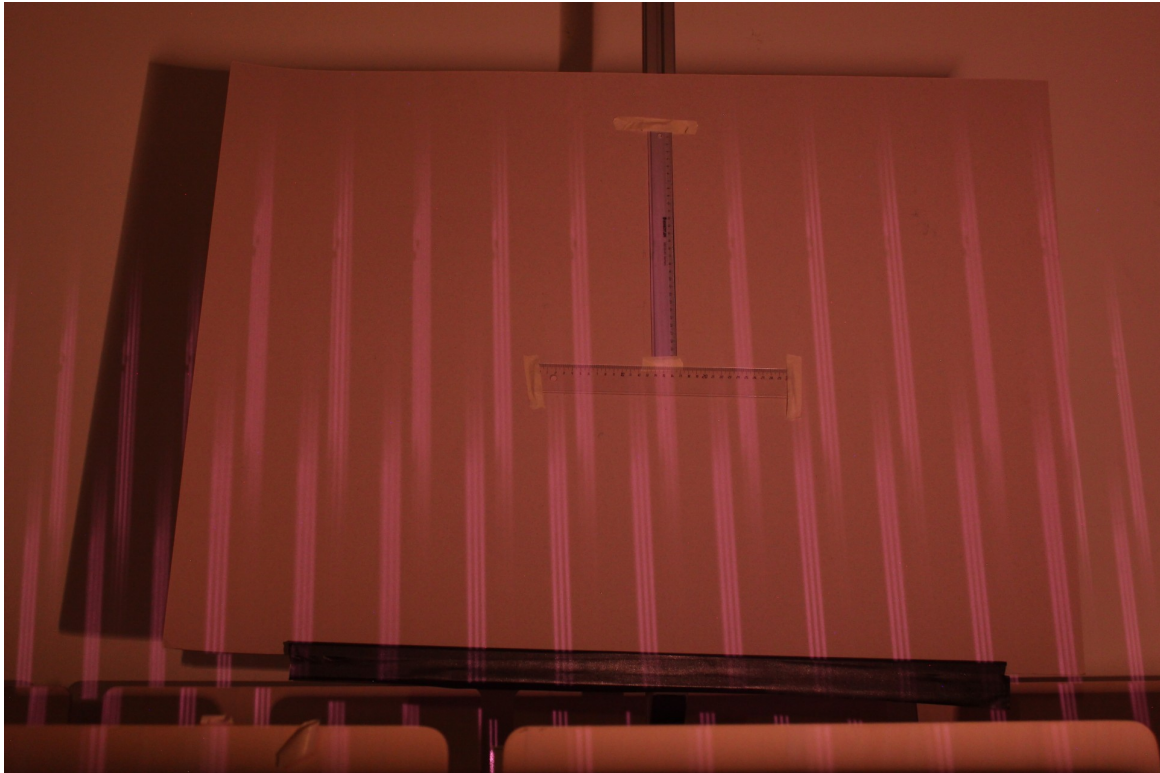


Abbildung A-3: Infrarotaufnahme des Ibeo Lux 2010 Lux 1 bei 11 m.





Abbildung A-4: Infrarotaufnahme des Ibeo Lux 2010 Lux 4 bei 11 m.



Abbildung A-5: Infrarotaufnahme des Velodyne VLP-16 bei 11 m.

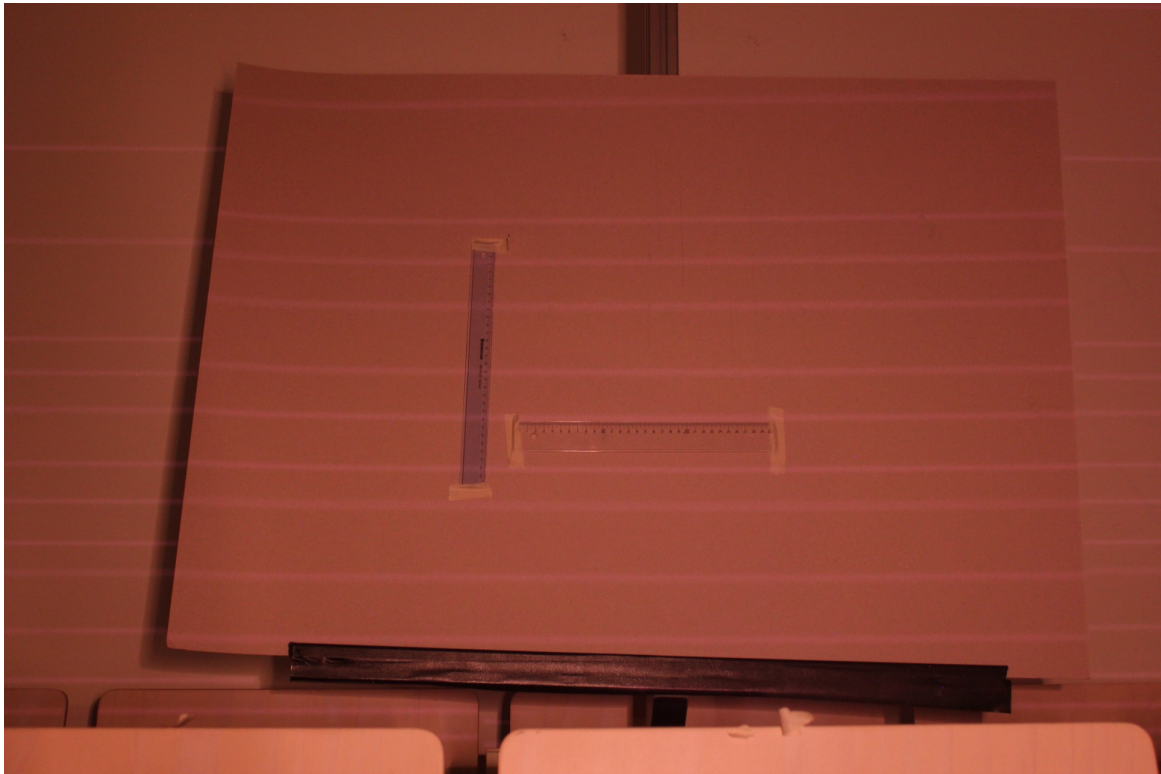
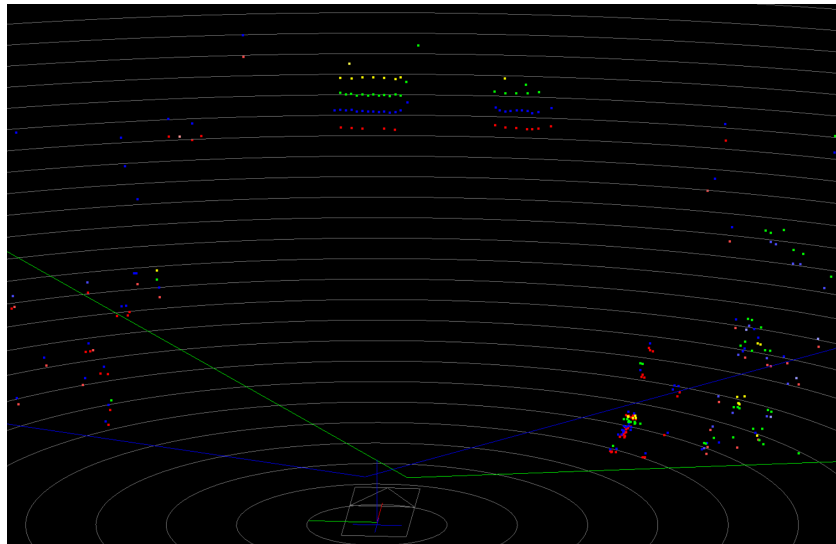


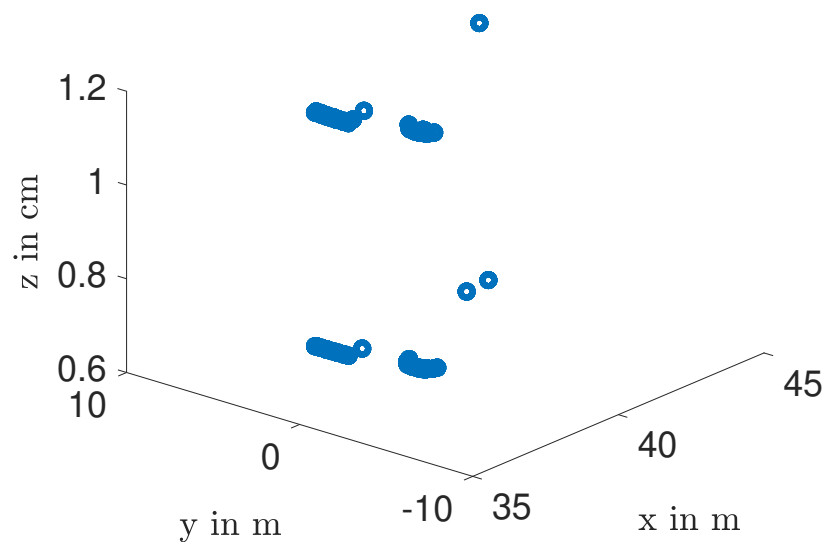
Abbildung A-6: Infrarotaufnahme des Velodyne VLP-32 bei 11 m.

#### A.4 Vergleich der realen und der simulierten Punktwolke

In der folgenden Abbildung A-7 ist die Punktwolke für eine Distanz von 40m für den realen Ibeo Lux 2010 und für das erweiterte Sensormodell dargestellt. Das Sensormodell ist nach den gleichen Einstellungen konfiguriert wie der Ibeo Lux 2010. Durch die Abbildung wird der Unterschied zwischen beiden Punktwolken verdeutlicht. Der reale Sensor detektiert mehr Punkte und Layer als das Sensormodell. Dies ist auf das fehlende Höhenprofil in der Simulation zurückzuführen.



(a) Reale Punktwolke



(b) Simulierte Punktwolke

Abbildung A-7: Vergleich der realen Punktwolke des Ibeo Lux 2010 und des erweiterten Sensormodells bei 40m.

## A.5 Zeitplan

Masterthesis Nr. 743/19

	April							Mai							Juni							Juli							August							September							Oktober																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Kalenderwoche	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Einarbeitung																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										</

☒ Soll  
☐ Ist

Beginn: 16.04.2019  
Abgabe: 16.10.2019

---

## Literaturverzeichnis

---

**Berk, M. et al.: A Stochastic Physical Simulation Framework (2019)**

Berk, Mario; Dura, Michael; Rivero, Jose Vargas; Schubert, Olaf; Kroll, Hans-Martin; Buschardt, Boris; Straub, Daniel: A Stochastic Physical Simulation Framework to Quantify the Effect of Rainfall on Automotive Lidar, in: SAE Technical Paper, 2019

**Browning, B. et al.: 3D Mapping for high-fidelity unmanned ground vehicle lidar simulation (2012)**

Browning, B.; Deschaud, J.-E.; Prasser, D.; Rander, P.: 3D Mapping for high-fidelity unmanned ground vehicle lidar simulation, in: The International Journal of Robotics Research, vol. 31, no. 12, pp. 1349 1376, 2012

**Bungartz, H.-J.; Griebel, M.; Zenger, C.: Einführung in die Computergraphik (2002)**

Bungartz, Hans-Joachim; Griebel, Michael; Zenger, Christoph: Einführung in die Computergraphik: Grundlagen, geometrische Modellierung, Algorithmen, Vieweg, Braunschweig, 2002

**Dohlus, R.: Technische Optik (2015)**

Dohlus, Rainer: Technische Optik, De Gruyter, Berlin Boston, 2015

**Eichler, H.; Eichler, J.: Laser (2015)**

Eichler, Hans; Eichler, Jürgen: Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen, Springer, Berlin Heidelberg, 2015

**Fürstenberg, K.; Dietmayer, K.: Fahrzeugumfelderfassung (2004)**

Fürstenberg, Kay; Dietmayer, Klaus: Fahrzeugumfelderfassung mitmehrzeiligen Laserscannern, Technisches Messen 71, Oldenburg Verlag, München, 2004

**Gebhardt, N.: Einige BRDF Modelle (2019)**

Gebhardt, Nikolaus: Einige BRDF Modelle, Zugriff 16.08.2019, URL: <http://www.irrlicht3d.org/papers/BrdfModelle.pdf>, 2019

**Glassner, A. S.: An Introduction to Ray-Tracing (1991)**

Glassner, Andrew S.: An Introduction to Ray-Tracing, Academic Press, London, 1991

**Goodin, C. et al.: Sensor Modeling for the Virtual Autonomous Navigation Environment (2009)**

Goodin, Chris; Kala, Raju; Carrillo, Alex; Liu, Linda Y.: Sensor Modeling for the Virtual Autonomous Navigation Environment, in: IEEE Sensors 2009, Christchurch, 2009

**Goodin, C. et al.: Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS (2019)**

Goodin, Christopher; Carruth, Daniel; Doude, Matthew; Hudson, Christopher: Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS, in: MDPI Electronics, 2019

**Grewe, R. et al.: Evaluation method and results for the accuracy of an automotive occupancy grid (2012)**

Grewe, R.; Komar, M.; Hohm, A.; Lueke, S.; Winner, H.: Evaluation method and results for the accuracy of an automotive occupancy grid, in: 2012 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), Istanbul, 2012

---

**Härtner, H.: Autonomes Fahren, vom Fahrzeug zum Lebensraum (2019)**

Härtner, Hendrik: Autonomes Fahren, vom Fahrzeug zum Lebensraum, in: next-mobility.news, Zugriff 29.09.2019, URL: <https://www.next-mobility.news/autonomes-fahren-vom-fahrzeug-zum-lebensraum-a-825621/>, 2019

**Hecht, E.: Optik (2018)**

Hecht, Eugene: Optik, De Gruyter, Berlin Boston, 2018

**Hirsenkorn, N. et al.: A Non-Parametric Approach for Modeling Sensor Behavior (2015)**

Hirsenkorn, N.; Hanke, T.; Rauch, A.; Dehlink, B.; Rasshofer, R.; Biebl, E.: A Non-Parametric Approach for Modeling Sensor Behavior, in: IEEE 16th International Radar Symposium (IRS), Dresden, 2015

**Huch, S.: Masterthesis, Entwicklung einer umfassenden Metrik für die Bewertung einer Lidar-Sensor-Simulation (2018)**

Huch, Sebastian: Entwicklung einer umfassenden Metrik für die Bewertung einer Lidar-Sensor-Simulation durch Betrachtung mehrerer aufeinander folgender Verarbeitungsebenen, Masterthesis, TU Darmstadt, 2018

**Ibeo: ibeo LUX 2010(R) Laserscanner Operating Manual (2010)**

Ibeo: ibeo LUX 2010(R) Laserscanner Operating Manual, in: ibeo LUX 2010(R) Laserscanner Operating Manual, 2010

**Ibeo-Automotive-AS: Ibeo ScaLa User Manual v1.6 (2018)**

Ibeo-Automotive-AS: Ibeo ScaLa User Manual v1.6, in: Ibeo ScaLa User Manual v1.6, 2018

**IPG-Automotive: New Sensor Model, Lidar RSI (2019)**

IPG-Automotive: New Sensor Model, Lidar RSI, in: Open House 2019, Session 3, 2019

**Kohanbash, D.: LIDAR (Laser Scanner) Review Comparisons (2014)**

Kohanbash, David: LIDAR (Laser Scanner) Review Comparisons, Zugriff 16.08.2019, URL: <http://robotsforroboticists.com/lidar-review-comparisons/>, 2014

**Lichti, D. D. et al.: Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds (2004)**

Lichti, Derek D.; Gordon, Stuart J.: Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording, in: FIG Working Week 2004, 2004

**Linnhoff, C.: Masterthesis, Entwicklung eines Radar-Sensormodells (2018)**

Linnhoff, Clemens: Entwicklung eines Radar-Sensormodells, Masterthesis, TU Darmstadt, 2018

**Mokrane Hadj-Bachir, P. d. S.: LIDAR sensor simulation in adverse weather condition (2019)**

Mokrane Hadj-Bachir, Philippe de Souza: LIDAR sensor simulation in adverse weather condition for driving assistance development, in: hal-01998668, 2019

**Müller, J.: Masterthesis, Konstruktion und Entwicklung eines Radar-Prüfstandes (2017)**

Müller, Jochen: Konstruktion und Entwicklung eines Prüfstandes für die Vermessung von Radar Reflexionseigenschaften von Pkw, Masterthesis, TU Darmstadt, 2017



---

**Pacala, A.: The Dead bug Problem (2019)**

Pacala, Angus: The Dead bug Problem, Zugriff 16.08.2019, URL: <https://ouster.com/blog/beam-aperture-and-the-dead-bug-problem>, 2019

**Parker, S. G. et al.: OptiX TM: A General Purpose Ray Tracing Engine (2010)**

Parker, Steven G.; Bigler, James; Dietrich, Andreas; Friedrich, Heiko; Hoberock, Jared; Luebke, David; McAllister, David; McGuire, Morgan; Morley, Keith; Robison, Austin; Stich, Martin: OptiX TM: A General Purpose Ray Tracing Engine, in: ACM Transactions on Graphics, Vol. 29, No. 4, Article 66, 2010

**Pegasus: Open Simulation Interface (2017)**

Pegasus: Open Simulation Interface, Zugriff 14.10.2019, URL: <https://www.pegasusprojekt.de/de/72/open-simulation-interface>, 2017

**Pentek, Q. et al.: Developing a predictive model for multi-beam lidars (2018)**

Pentek, Quentin; Allouis, Tristan; Strauss, Olivier; Fiorio, Christophe: Developing and validating a predictive model of measurement uncertainty formulti-beam lidars: application to the Velodyne VLP-16, in: IEEE 2018 Eighth International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA), Xi'an, 2018

**Plagemann, C. et al.: A Nonparametric Bayesian Measurement Model for Range Finders (2007)**

Plagemann, Christian; Kersting, Kristian; Pfaff, Patrick; Burgard, Wolfram: Gaussian Beam Processes: A Nonparametric Bayesian Measurement Model for Range Finders, in: Conference: Robotics: Science and Systems III, Atlanta, 2007

**Reeb, W. et al.: Der Status quo von Lidar in selbstfahrenden Autos (2019)**

Reeb, Winfried; Härter, Hendrik: Der Status quo von Lidar in selbstfahrenden Autos, in: next-mobility.news, Zugriff 16.08.2019, URL: <https://www.next-mobility.news/der-status-quo-von-lidar-in-selbstfahrenden-autos-a-836047/>, 2019

**Richarz, H. R. et al.: Fahrer Assistenzsysteme Der Weg zum autonomen Fahrzeug (2019)**

Richarz, Hans Robert; Kirchbeck, Benjamin: Fahrer Assistenzsysteme Der Weg zum autonomen Fahrzeug, in: next-mobility.news, Zugriff 29.09.2019, URL: <https://www.next-mobility.news/fahrer-assistenzsysteme-der-weg-zum-autonomen-fahrzeug-a-795139/>, 2019

**Roeder, S.: Fahrsimulation und autonomes Fahren (2018)**

Roeder, Susanne: Fahrsimulation und autonomes Fahren, in: Stuttgarter Zeitung, Zugriff 11.10.2019, URL: <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.vorreiter-europa-fahrsimulation-und-autonomes-fahren.2e0ea9b8-7724-4428-a094-4e67d5525052.html>, 2018

**Rosenberger, P. et al.: Benchmarking and Functional Decomposition of Automotive Lidar Sensor Models (2019)**

Rosenberger, Philipp; Holder, Martin; Huch, Sebastian; Winner, Hermann; Fleck, Tobias; 2, Marc René Zofka; D hondt, J. Marius Zöllner 2 andThomas; Wassermann, Benjamin: Benchmarking and Functional Decomposition of Automotive Lidar Sensor Models, in: 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Paris, 2019

---

**Rosenberger, P. et al.: Analysis of Real World Sensor Behavior (2018)**

Rosenberger, Philipp; Holder, Martin; Zirulnik, Marina; Winner, Hermann: Analysis of Real World Sensor Behavior for Rising Fidelity of Physically Based Lidar Sensor Models, in: 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Changshu, Suzhou, China, 2018

**Rosenberger, P. et al.: Towards a Generally Accepted Validation Methodology (2019)**

Rosenberger, Philipp; Wendler, Jan Timo; Holder, Martin; Linhoff, Clemens; Berghöfer, Moritz; Winner, Hermann; Maure, Markus: Towards a Generally Accepted Validation Methodology for Sensor Models - Challenges, Metrics and First Results, in: Graz Symposium Virtual Vehicle (GSVF) 2019, 2019

**Rothkirch, A.: Diss., Systematische Bestimmung der bidirektionalen, spektralen Reflexionsfunktion (2001)**

Rothkirch, Andre: Systematische Bestimmung der bidirektionalen, spektralen Reflexionsfunktion (BRDF) von städtischen Flächen aus multispektralen Luftbildern und Labormessungen, Dissertation Universität Hamburg, 2001

**Schaermann, A. et al.: Validation of vehicle environment sensor models (2017)**

Schaermann, A.; Rauch, A.; Hirsenkorn, N.; Hanke, T.; Rasshofer, R.; Biebl, E.: Validation of vehicle environment sensor models, in: IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Los Angeles, 2017

**Schiele, H.-G.: Computergrafik für Ingenieure (2012)**

Schiele, Hans-Günther: Computergrafik fuer Ingenieure - Eine anwendungsorientierte Einführung, Springer, Berlin Heidelberg, 2012

**Shell, J. R.: Bidirectional Reflectance An Overview (2004)**

Shell, James R.: Bidirectional Reflectance: An Overview with Remote Sensing Applications and Measurement Recommendation, in: Center for Imaging Science; Rochester Institute of Technology, 2004

**Sheng, Y.: Quantifying the Size of a Lidar Footprint: A Set of Generalized Equations (2008)**

Sheng, Yongwei: Quantifying the Size of a Lidar Footprint: A Set of Generalized Equations, in: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 5 No.3, 2008

**Träger, F.: Handbook of Lasers and Optics (2015)**

Träger, Frank: Handbook of Lasers and Optics, in: Träger, Prof. Dr. Frank (Hrsg.): Handbook of Lasers and Optics, Springer, Berlin Heidelberg, 2015

**Velodyne: Velodyne VLP-32 User Manual (2017)**

Velodyne: Velodyne VLP-32, in: Velodyne VLP-32 User Manual, 2017

**Wang, S. et al.: Shader-based Sensor Simulation (2012)**

Wang, Shuiying; Heinrich, Steffen; Wang, Miao; Rojas, Raul: Shader-based Sensor Simulation for Autonomous Car Testing, in: 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Anchorage, Alaska, USA, 2012

**Winner: Mechatronik und Assistenzsysteme im Automobil (2019)**

Winner: Mechatronik und Assistenzsysteme im Automobil, Vorlesungsskript SS2019, TU Darmstadt, 2019

---

**Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015)**

Winner, H.: Quo vadis, FAS?, in: Winner, H.; Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

**Zhang, Y. et al.: Quantitive Analysis on Geometric Size of Lidar Footprint (2014)**

Zhang, Yongjun; Shen, Xiang: Quantitive Analysis on Geometric Size of Lidar Footprint, in: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 11 No.3, 2014

**Zirulnik, M.: Masterthesis, Untersuchung der Charakteristik der Mehrzielfähigkeit sowie des Rauschverhaltens eines Automotive LIDAR Sensors (2017)**

Zirulnik, Marina: Untersuchung der Charakteristik der Mehrzielfähigkeit sowie des Rauschverhaltens eines Automotive LIDAR Sensors, Masterthesis, TU Darmstadt, 2017